

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«На правах  
рукопису» УДК 621.391.82 (075)

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

Анатолій ОРЛОВ  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2021 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: ”Термофізичні сенсори газу”

Виконав : студент 2-го курсу, групи ДП-92МН  
(шифр групи)

Бойкиня Артур Олексійович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц. к.т.н. наук Мачулянский О.В.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю к.ф.-м.н., с.н.с. Свечніков Г.С.  
(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц. к.т.н., Діденко Ю.В.  
(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

## Завдання на дипломний проект, дипломну роботу

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет Факультет електроніки  
(повна назва)

Кафедра Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність (спеціалізація): 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувач кафедри

Анатолій ОРЛОВ  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«    »                      2021р.

### ЗАВДАННЯ на магістерську дисертацію студенту Бойкині Артуру Олексійовичу (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: “Термофізичні сенсори газу”  
науковий керівник дисертації: доц., к.т.н. Мачулянський О.В.  
затверджені наказом по університету від «    »                      20     р. №
2. Строк подання студентом дисертації: 6 травня 2021
3. Об'єкт дослідження: Смарт сенсор потоку і густини газу
4. Предметом дослідження: Спосіб визначення потоку і густини
5. Зміст дипломної роботи : 1. Ознайомлення з існуючими прототипами  
2.Ознайомлення з принципом роботи сенсора. 3. Розрахунок параметрів газу. 4.  
Розробка MEMC сенсора. 5. Ознайомлення з принципами роботи і архітектурою  
програмованої системи на кристалі CY3210 – PSoCEVAL1. 6. На базі заданого  
сенсора і мікроконтролера створимо повністю функціональний пристрій. 5.  
Обговорення результатів дослідження та написання дипломної роботи.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 1. Конструкція сенсора. 2.  
Блок-схема пристрою. 3. Конструкція програмованої системи на кристалі CY3210  
– PSoCEVAL1.

7. Орієнтовний перелік публікацій: \_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів проекту (роботи)<sup>1\*</sup>

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдан ня видав	завдан ня прийняв

9. Дата видачі завдання: 21.01.2021

#### Календарний план

з/ п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення з принципом роботи сенсору	01.02.2021	
2	Виведення розрахунків параметрів газового середовища	15.02.2021	
3	Ознайомлення з принципами роботи і архітектурою програмованої системи на кристалі CY3210 – PSoCEVAL1	15.03.2021	
4	На основі даного сенсору і мікроконтролера створити функціональний пристрій.	15.04.2021	
5	Обговорення результатів дослідження та написання дипломної роботи	01.06.2021	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Бойкиння А. О.  
(ініціали, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Мачулянський О.В.  
(ініціали, прізвище)

<sup>1\*</sup> Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 80 сторінках, вони містять 4 розділи, 29 ілюстрацій та 12 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є МЕМС сенсори потоку і густини газу. Предметом дослідження є усунення вже недоліків вже існуючих схожих систем, збільшення точності виміру і діапазону вимірюваних тисків газу і безпечне функціонування системи в критичних умовах.

Метою роботи є досягнення ефективного функціонування сенсору на сучасному рівні, з використанням допоміжних функціональних модулів, для контролю роботи системи і отримати довершений функціональний прилад, який буде легкий у використанні, навіть для звичайного користувача.

У першому розділі дано теоретичні відомості, приклад схожих існуючих систем і їх аналіз. В другому розділі наведені і виведені розрахункові формули для визначення потоку, густини і тиску газу. В третьому розділі наведені основні теоретичні положення МЕМС-технології і приклад виготовлення терморезистивного перетворювача. В четвертому розділі показано реалізацію вже кінцевого функціонального приладу, який працює на основі PSoC.

ГАЗОВИЙ СЕНСОР, СЕНСОР ПОТОКУ, СЕНСОР ГУСТИНИ,  
ПРОГРАМОВАНА СИСТЕМА, PSoC, PRoC, АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ТЕРМОДЕТЕКТОР

## ABSTRACT

The diploma work was performed on 81 pages; they contain 4 sections, 29 illustrations, 2 annexes and 15 sources in the list of links.

The object of research is MEMS sensors of gas flow and density. The subject of the study is to eliminate the shortcomings of existing similar systems, increase the accuracy of measurement and the range of measured gas pressures and the safe operation of the system in critical conditions.

The aim of the work is to achieve efficient operation of the sensor at a modern level, using auxiliary functional modules, to control the system and get a perfect functional device that will be easy to use, even for the average user.

The first section provides theoretical information, an example of similar existing systems and their analysis. The second section presents and derives calculation formulas for determining the flow, density and pressure of the gas. The third section presents the main theoretical provisions of MEMS technology and an example of manufacturing a thermoresistive converter. The fourth section shows the implementation of the already final functional device that works on the basis of PSoC.

GAS SENSOR, FLOW SENSOR, DENSITY SENSOR, PROGRAMMABLE  
SYSTEM, PSoC, PRoC, ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER,  
THERMODETECTOR

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. Огляд існуючих прототипів.....	11
1.1 Опис поведінки теплового витратоміра.....	11
1.2 Калориметричний датчики потоку.....	15
1.3 Патент США NoUS8225652B2.....	17
1.4 Патент США NoUS2009/0164163A1.....	19
1.5 Перетворювачі виробництва компанії Sensirion.....	20
РОЗДІЛ 2. Визначення основних параметрів газу.....	24
2.1 Спосіб визначення густини газів.....	24
2.2 Спосіб визначення потоку газів.....	31
2.3 Визначення тиску газів.....	36
2.4 Висновки до розділу.....	53
РОЗДІЛ 3. МЕМС сенсор газу.....	40
3.1 Основні теоретичні положення МЕМС-технології.....	40
3.2 Технологічні цикли.....	44
3.3 Виготовлення терморезистивного перетворювача.....	45
3.4 Залежність зміни температури в площині мембрани.....	48
3.5 Динамічні методи вимірювання теплофізичних характеристик середовищ.....	51
3.6 Висновки до розділу.....	53
РОЗДІЛ 4. Обробка і передача сигналів з сенсора.....	54
4.1 Основні теоретичні положення по архітектурі мікропроцесорного ядра PSoC.....	54
4.2 Основні теоретичні положення по архітектурі бездротового інтерфейсу PRoC.....	59
4.3 Газові сенсори на основі PSoC і PRoC.....	61
4.4 Температурний датчик на основі мікроконтролера PSoC Cypress.....	63

4.5 Обробка сигналу.....	72
4.6 Висновки до розділу.....	75
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

PSoC - (*англ.* Programmable System-on-Chip) - програмована система на чипі

МЕМС - мікроелектромеханічні системи

ШІМ – широтно-імпульсний модулятор, широтно-імпульсна модуляція

АЦП – аналого-цифровий перетворювач, аналого-цифрове перетворення

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, цифро-аналогове перетворення

ККД – коефіцієнт корисної дії

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій

$v$  - середня швидкість руху молекул

$\lambda$  - теплопровідність газу

$C_v$  - теплоємність одиниці об'єму

$C$  – швидкість протікання дифузії тепла

$l$  - середня довжина вільного пробігу молекул

$T$  - температура газу

$T_0$  - амплітуда коливань температури нагрівача

$x$  - координата нормалі до межі напівпростору.

$T_c$  - температура поверхні

$\omega$  - частота коливань температури

$\omega_0$  – константа, котра дорівнює частоті автоколивань температури нагрівача при нульовому потоці

$\Delta\phi$  - зсув фази коливань температури

$A$  – константа, котра визначається геометрією каналу та відстанню між нагрівачем та тепловим сенсором



$V$  - швидкість руху газу

$S$  - площа поперечного перерізу

$d$  - відстань між нагрівачем і термоприймачем

$n$  - число молекул в одиниці об'єму

$\sigma$  - ефективний переріз зіткнень

$\rho$  - величина потоку

$m$  - маса молекул

$D$  - температуропровідність

$k$  – стала Больцмана

$a$  - коефіцієнт з розмірністю  $m^4/kg^2$

$t$  - час

$\rho_o$  – відома густина газу

$U_{op}$  - опорна напруга

LIR – відносна пульсація струму

$e$  – заряд електрона

$m_e^*$  і  $m_p^*$  - ефективні маси електронів і дірок

$h$  – постійна Планка

$F$  – енергія Фермі

A, B, C – коефіцієнти Стейнхарт-Харта

## ВСТУП

Значну частину всіх типів вимірювань, які виконуються в сучасних промисловості та науці, займають вимірювання температури. Серед засобів вимірювання температури значне місце займають терморезисторні первинні перетворювачі, робота яких заснована на залежності їх опору від температури. Останнім часом терморезисторні перетворювачі виготовляються по мікроелектронних технологіях створення МЕМС, інтегруються з вторинними перетворювачами на одному кристалі і відрізняються багатofункціональністю. Крім безпосереднього вимірювання температури, сучасні терморезисторні перетворювачі широко використовуються для дослідження фізичних параметрів газу або рідини - тиску, об'ємної витрати, лінійної швидкості, хімічного складу середовища тощо. Методики проведення вимірювань передбачають використання в складі первинного перетворювача активного нагрівача і використовують фізичні процеси теплообміну між окремими елементами терморезистивних перетворювачів, виготовлених по технології МЕМС. Крім традиційних методик аналізу процесів стаціонарного теплообміну, на сьогоднішній день актуальні методики, що передбачають дослідження перехідних процесів встановлення термодинамічної рівноваги. Для проведення таких вимірювань розроблено значну кількість різноманітних методик і конструкцій мікроелектронних терморезистивних перетворювачів.

Метою роботи є розробка багатofункціонального сенсору виміру потоку і густини газу на основі апаратної платформи PSoC, яка вимірює параметри сенсору який в свою чергу виготовлений по технології МЕМС.

В ході роботи передбачається рішення наступних задач:

1. Аналіз науково-технічної літератури, аналіз конструкцій сучасних датчиків виміру потоку які працюють на основі постійного струму.
2. Аналіз методів визначення теплофізичних параметрів середовищ з використанням первинних перетворювачів на технології МЕМС.
3. Розробка багатofункціональних сенсорів для виміру теплофізичних параметрів середовищ на основі PSoC.

4. Формування рекомендацій для подальшої розробки вимірювального інструменту, проведення експериментальних досліджень і аналіз їх результатів.

## РОЗДІЛ 1

### Огляд існуючих прототипів

#### 1.1 Опис поведінки теплового витратоміра.

Запропонований Кінгом (L.V. King) в 1914 році анемометр з ниткою розжарювання (термоанемометр) являє собою перше в своєму роді пристрій здатний вимірювати потік рідини за допомогою теплових датчиків. В Термоанемометрі, тонкий дріт електрично нагрівається до температури вищої, ніж температура навколишнього середовища. Навколишній потік охолоджує прилад до деякої температури. В силу відомого співвідношення між електричним опором дроту і її температури, швидкість рідини може бути визначена, якщо виміряти опір проводу. Із-за своєї неміцності, термоанемометри часто не підходять для промислового використання, так як у багатьох випадках застосування на практиці зустрічаються забруднення, які можуть викликати пошкодження цих тендітних пристроїв. Термоанемометри також вважаються інтрузивними пристроями, оскільки датчики не тільки вимірюють властивості потоку, але також порушують його перебіг. Більш життєздатним рішенням в таких випадках є використання теплового витратоміра. Тепловий витратомір є засобом неруйнівного контролю тобто, він не заважає перебігу потоку. Застосовуючи ті ж принципи, що і його попередник, ці інструменти оснащені кожухом навколо проводів, підвищуючи свою довговічність, а також точність у вимірюванні потоку рідину.

Теплові витратоміри широко використовуються для вимірювань газових потоків в різних використаннях: від теплопередачі до хімічних реакцій. Ці інструменти є особливо затребуваними в промисловості із-за їхньої простої і надійною конструкції, так як вони не містять ніяких рухомих частин.

Проект моделі, використовуваної в дослідженні, був заснований на технологіях: кремній на ізоляторі (КНІ), (КМОП), MEMC теплового потоку (silicon on insulator (SOI), complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) MEMS thermal flow) теплового датчик потоку. Модель складається з контрольної

мікросхеми, яка включає в себе п'ять паралельних металевих провідників полоскового типу. Провідник в центрі, використовується для підвищення температури пристрою до  $300^{\circ}\text{C}$ . Всі провідники можна використовувати для визначення температури за допомогою співвідношення між питомим опором металу і абсолютною температурою. Чотирьохпровідне вимірювання використовується для отримання значення опору.

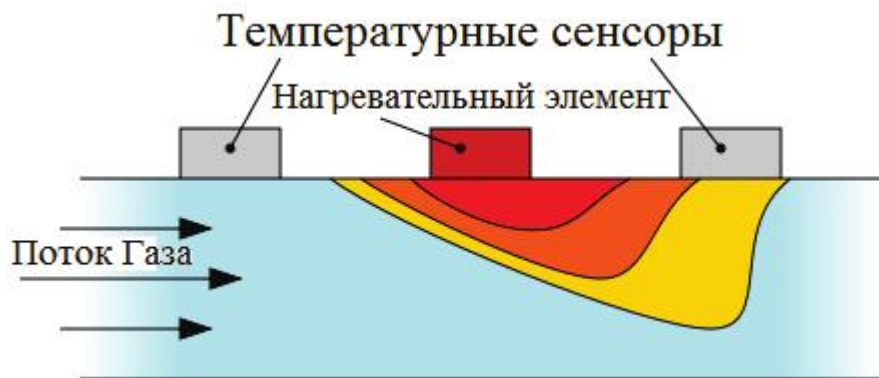


Рисунок 1.1 - Схематичне зображення теплового витратоміра

При виготовленні контрольного чіпа, застосовувалася технологія глибокого реактивного іонного травлення задньої поверхні чіпа для видалення кремнієвої підкладки з-під чутливих елементів. Така процедура обробки різко зменшила теплопровідність, що спостерігається у нагрівального елемента, і, як наслідок, значно знизила потужність, необхідну для підвищення температури на бажане значення.

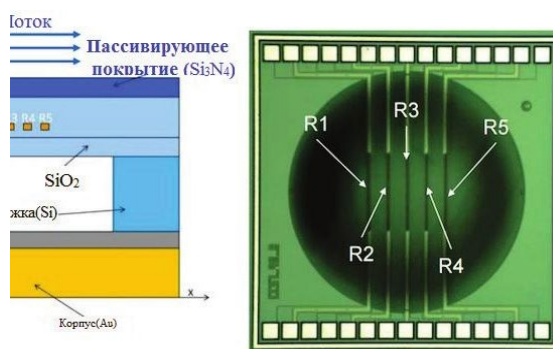


Рисунок 1.2 - Геометрія теплового датчика потоку. На малюнку зліва схематично показаний поперечний зріз контрольного пристрою, зображення праворуч показує вид зверху

У своєму аналізі, дослідницька група об'єднала три різних галузі фізики - електричний струм, теплопередача в твердих тілах і ламінарний потік рідини (газів) - для створення мультифізичної моделі. Тобто струм зміщення використовується для локального нагрівання компонентів, за допомогою ефекту Джоуля, після чого надлишок тепла розсіюється в результаті теплопровідності і конвекційного теплообміну.

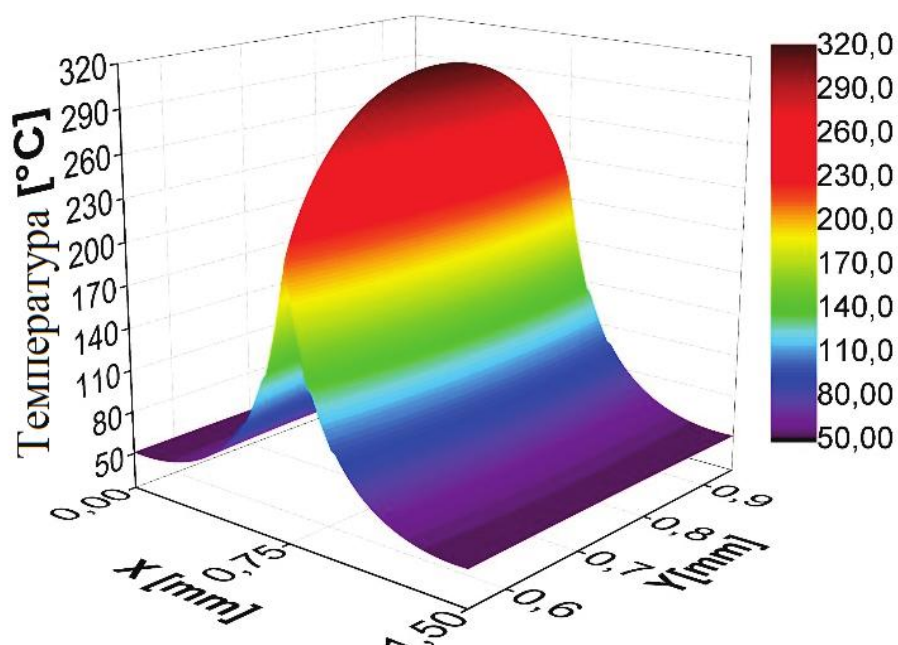


Рисунок 1.3 - Розподіл температури в шуканій області [2]

## 1.2 Калориметричний датчики потоку

Калориметричні датчики потоку рідини і газу. Принцип дії заснований на вимірюванні теплової енергії, що віддається потоку досліджуваного середовища. Відмітна особливість - відсутність рухомих механічних деталей. Вихід: частотний, дискретний, аналоговий.

Принцип дії калориметричних датчиків заснований на вимірюванні енергії, що витрачається на теплової нагрів зонда, що охолоджується потоком вимірюваного середовища (рідини або газу).

Калориметричні датчики GHM-Messtechnik влаштовані таким чином. У датчик потоку вбудовані два температурних сенсора, кожен з яких знаходиться в хорошому тепловому контакті з досліджуваним середовищем, але теплоізовлювані один від одного.

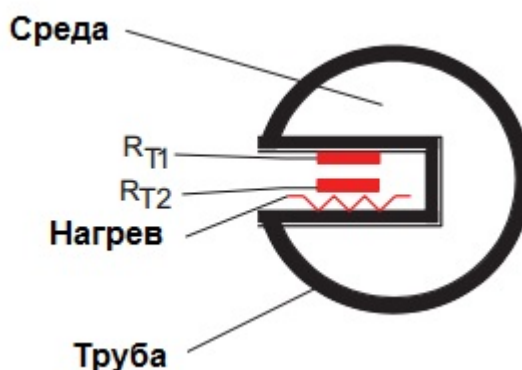


Рисунок 1.1 - Пристрій калориметричного датчика [4]

Один з сенсорів нагрівається до постійної, в порівнянні з ненагрітим сенсором, температури. Таким чином при нерухомому потоці виникає певна різниця температур. У міру того, як потік приходить в рух, нагрітий датчик починає втрачати теплову енергію, яка компенсується регулюючим пристроєм до тих пір, поки зафіксована в стані спокою різниця температур не відновиться. Необхідна для цього витрачається енергія пропорційна миттєвій витраті досліджуваного середовища. При цьому ненагрітий датчик реєструє температуру потоку, забезпечуючи, тим самим, можливість температурної компенсації. Тому, величина потоку визначається правильно навіть при коливаннях температури контролюваного середовища.

Різні вимірювані середовища по різному впливають на час реакції, оскільки мають різну теплопровідність. Загальне правило полягає в тому, що чим гірше теплопровідність середовища, тим більше повинна бути швидкість потоку, щоб її можна було зареєструвати. У калориметричному принципі вирішальну роль, з точки зору досягнутих результатів вимірювання, грають як стан вимірюваного середовища, так і її температура. Усі запропоновані виробником стандартні

прилади розраховані і відкалібровані для води при температурі від 0 до + 85 ° С. При відхиленнях середовища вимірювання по температурі (нижче 0 або вище +85 ° С), консистенції (по в'язкості, наприклад) або для роботи з повітрям або газом, слід вибирати конфігурацію приладу відповідно до індивідуальних рекомендацій виробника. Для правильного монтажу приладів є принциповим правильно вибрати місце установки, щоб «носик» датчика був повністю занурений в потік вимірюваного середовища і в позначеному положенні щодо напрямлення потоку.



Рисунок 1.5 - Калориметричний датчик потоку [4]

### 1.3 Патент США NoUS8225652B2

Даний патент був опублікований 24 липня 2012 японськими винахідниками Манабу Мураока, Масакі Сео, Джунічі Мацуда і Масанори Анза. Пристрій, описане в даному патенті, являє собою пару термочутливих елементів з температурою вище, ніж в середовищі над ними, задається розігрваючим елементом (нагрівачем). Робота першого блоку для розрахунку витрат речовини передбачає вимір різниці температур термочутливих елементів. Він призначений для вимірювань швидкості потоку в певному встановленому діапазоні і забезпечує високу точність. Робота



другого блоку заснована на величині потужності, яка необхідна розігріву для підтримки постійної температури в просторі над ним.

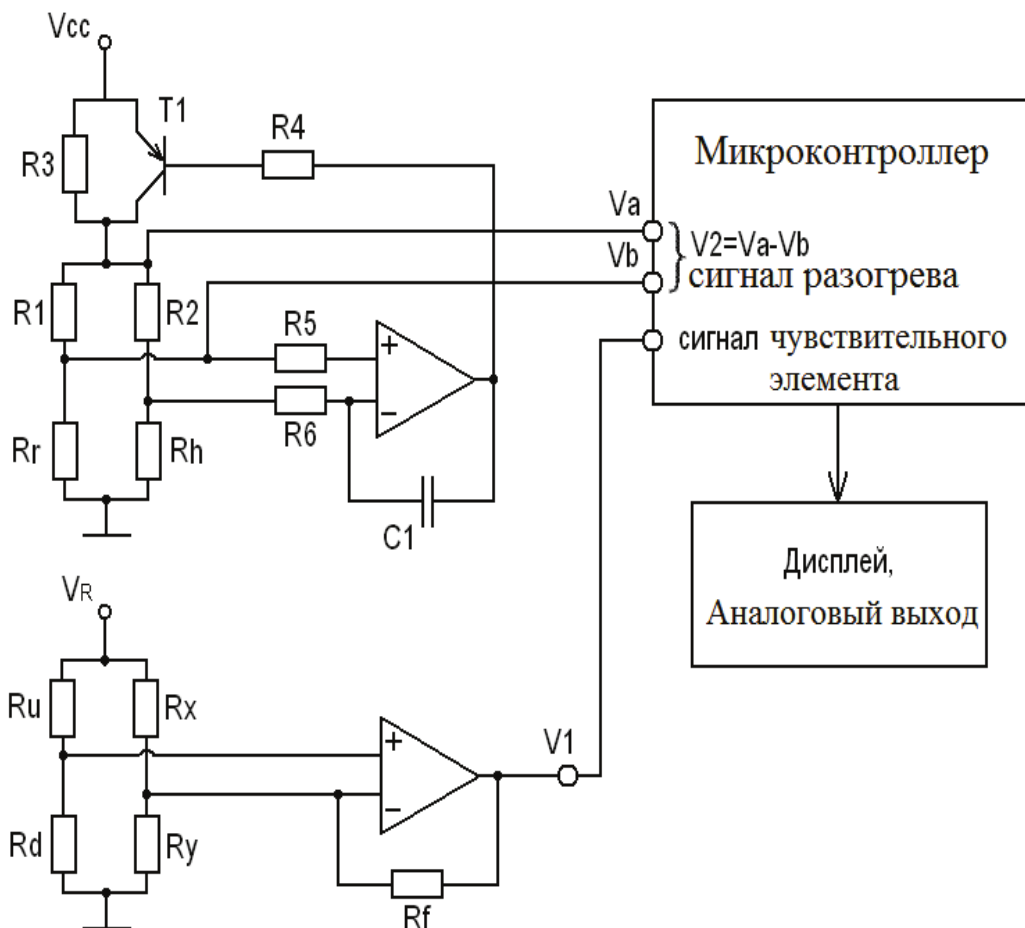


Рисунок 1.6 - Схема електрична принципова пристрою для зняття вимірювального сигналу [1]

У другому випадку точність вимірювань нижче, однак, при високих значеннях швидкості потоку, перший блок може досягати насичення, і вимірювання здійснюються другим блоком. Якщо швидкість потоку речовини перевищує встановлений діапазон вимірювань для першого блоку, як джерело вихідного сигналу використовується другий вимірювальний блок. Завдяки цьому принципу досягається розширення діапазону вимірювань без застосування окремих термочутливих елементів для малих і великих значень швидкості потоку газу [1].



Рисунок 1.7 - Структура первинного перетворювача втрат [1]

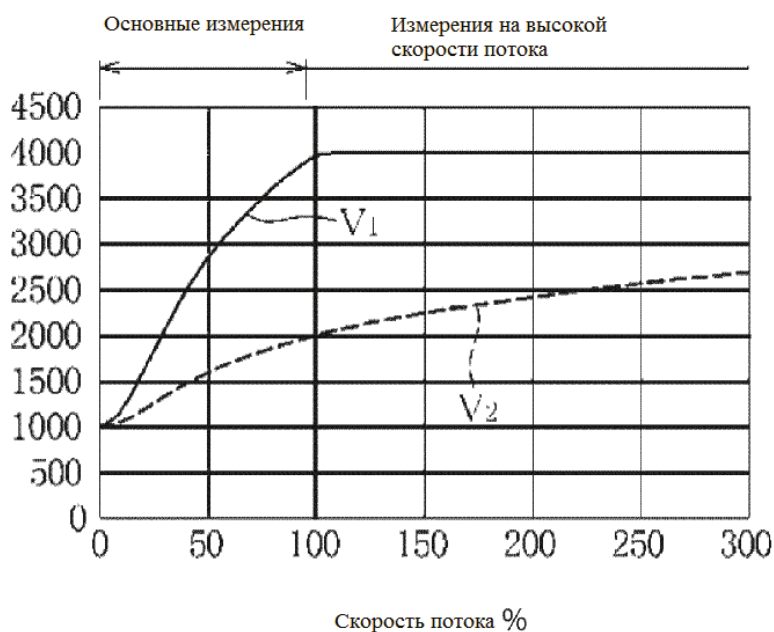


Рисунок 1.8 - Співвідношення характеристики розігріву і диференціального сигналу термочутливих елементів первинного перетворювача [1]

#### 1.4 Патент США NoUS2009/0164163A1

Даний патент опублікований 25 червня 2009 винахідниками Джао Фен венге, Чай Чан Чонг, Яон Яо і Ліджа Уеном. Первинний перетворювач об'ємної витрати, описаний в патенті, включає в себе пару тонкоплівкових нагрівальних елементів, пару термочутливих елементів і пару опорних терморезисторів, розміщених по

обидва боки від нагрівачів. Всі компоненти, крім опорних терморезисторів, розташовані на тонкій діелектричній термоізолюваній мембрані, на підкладці з кремнію р- або n-типу з орієнтацією  $\langle 100 \rangle$  методом анізотропного травлення. Обидві пари нагрівач-термочутливий елемент є первинні перетворювачі термоанемометричного типу. Опорні терморезистори необхідні для компенсації впливу температури зовнішнього середовища, тому вони розташовані на напівпровідниковій підкладці [2].

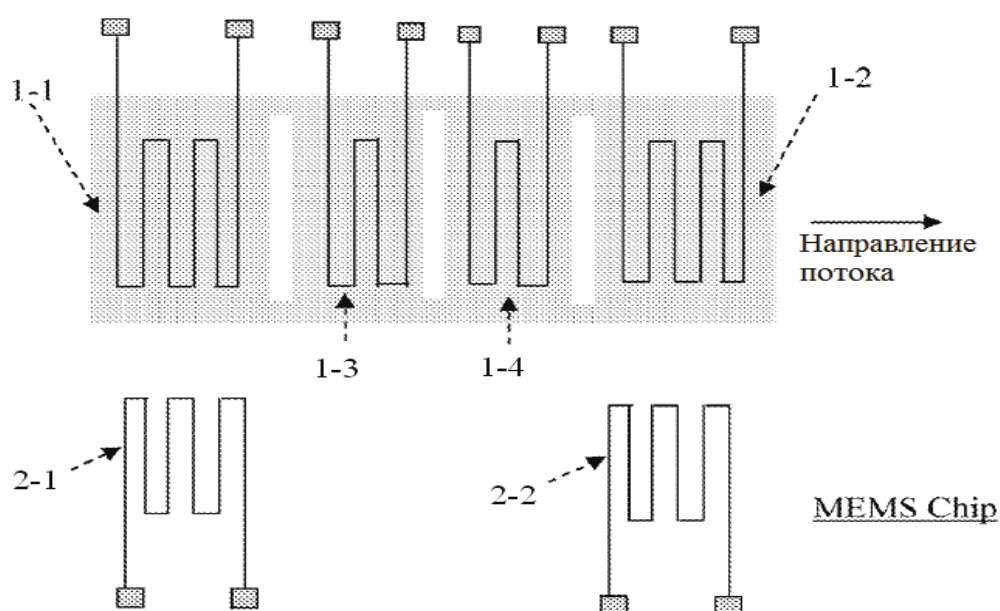


Рисунок 1.9 - Розташування компонентів первинного перетворювача на підкладці: 1-1, 1-2 - термочутливі елементи; 1-3, 1-4 - розогреваючі елементи; 2-1, 2-2 - опорні терморезистори [2]

Даний первинний перетворювач керується трьома схемами: перша - для роботи в першому діапазоні вимірювань, друга - в другому, і третя - для проведення точних вимірювань при низьких значеннях лінійної швидкості потоку газу. В останньому випадку для вимірювань використовується термокалориметричний принцип [2].

Робота даної групи пристроїв також заснована на термокалориметричному принципі виміру. Керований нагрівальний елемент встановлений в центрі мембрани і датчики температури встановлені симетрично по обидві сторони від

нагрівача в напрямку потоку. Стабілізована тиском мембрана, яка має скляний шар пасивації, закритий з фронтальної сторони, витравлення на кремнієвому чіпі знизу. Будьякий потік середовища над цією мембраною призводить до переносу тепла від нагрівача і викликає появу електричного сигналу. Датчик реагує на перерозподіл температури за час 1,7мс. Плоска поверхня скла запобігає осіданню забруднень. Одночасно "повітряна подушка" дозволяє використовувати перетворювач в умовах сильної вібрації [3].

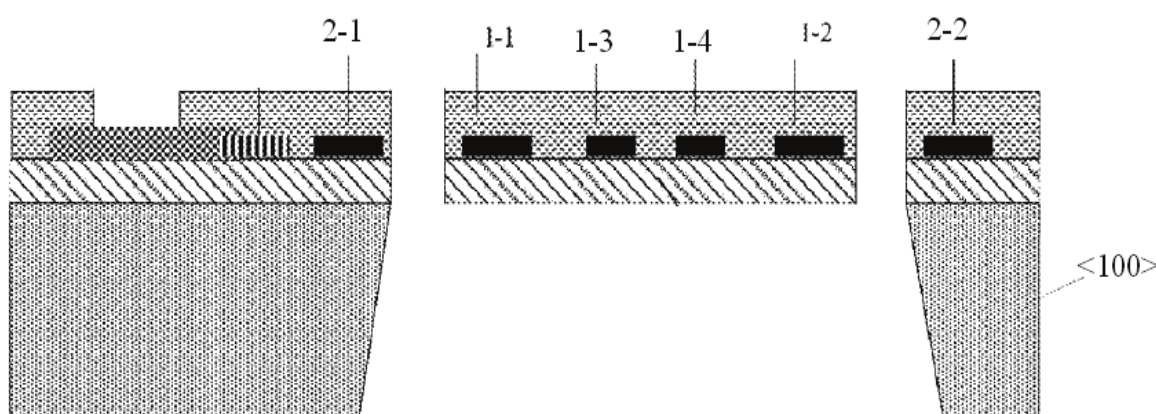


Рисунок 1.10 - Структура первинного перетворювача втрат в поперечному зрізі [2]

### 1.5 Перетворювачі виробництва компанії Sensirion

Запатентована КМОП схема інтегрована на одному чіпі дозволяє здійснювати програмований, високоточне посилення і оцінку генерується аналогового сигналу датчика. Датчик потоку газу CMOSens® здатний вимірювати напругу зі значеннями всього 500 нВ з довгостроковою стабільністю і без шуму. Два інтегрованих 16-бітних АЦП оцифровує сигнал датчика потоку у вигляді пакетів тривалістю 0,7 мс.

Інтегрований цифровий 20-бітний модуль лінеаризації, підключений до виходу, проводить корекцію нелінійності кожного вимірюваного пакета для конкретного датчика і компенсує можливі температурні впливи. Далі лінеарні

пакети, отримані за певний запрограмований період, усереднюються. Чіп CMOSens® може працювати як з цифровим, так і аналоговим виходом, в залежності від необхідності.

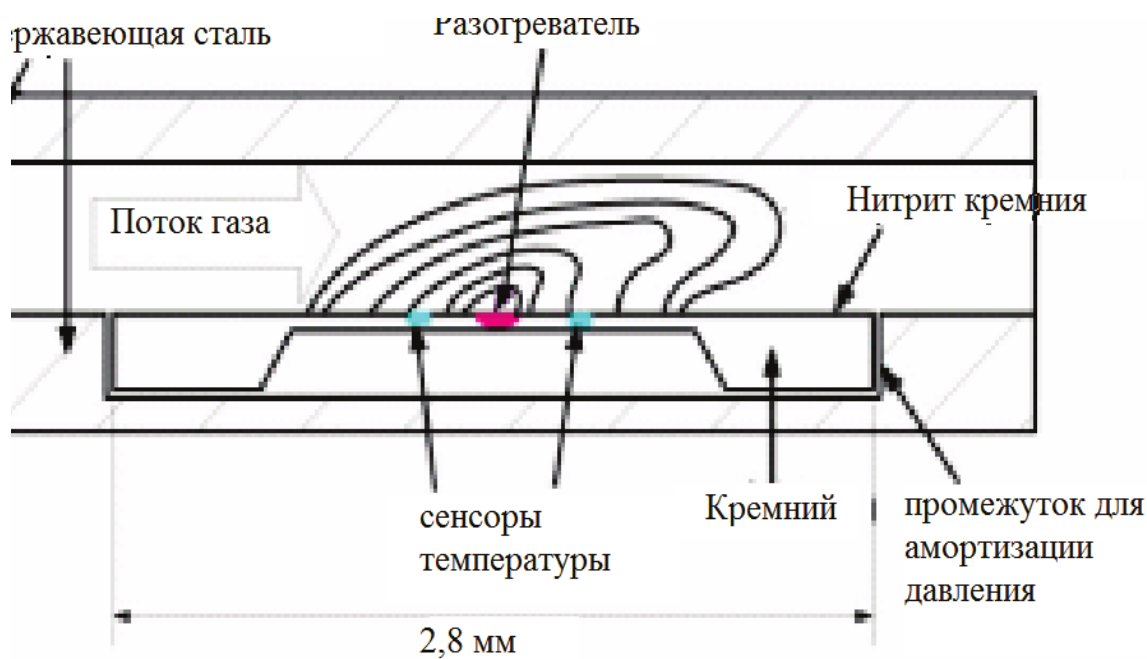


Рисунок 1.11 - Принцип роботи температурного вимірювача швидкості потоку газу CMOSens® [3]

Крім первинного перетворювача швидкості потоку, до його складу входить перетворювач температури, що вимірює розігрів самого чіпа і розігрів газу. Ці дані використовуються для теплової компенсації показників.

Чіп CMOSens® поміщений в вакуумнооцільний корпус з нержавіючої сталі, який з'єднаний з алюмінієвим корпусом через кільцеве вакуумне з'єднання. Така конструкція корпусу дозволяє SFC4000 працювати при високих значеннях вхідного тиску.

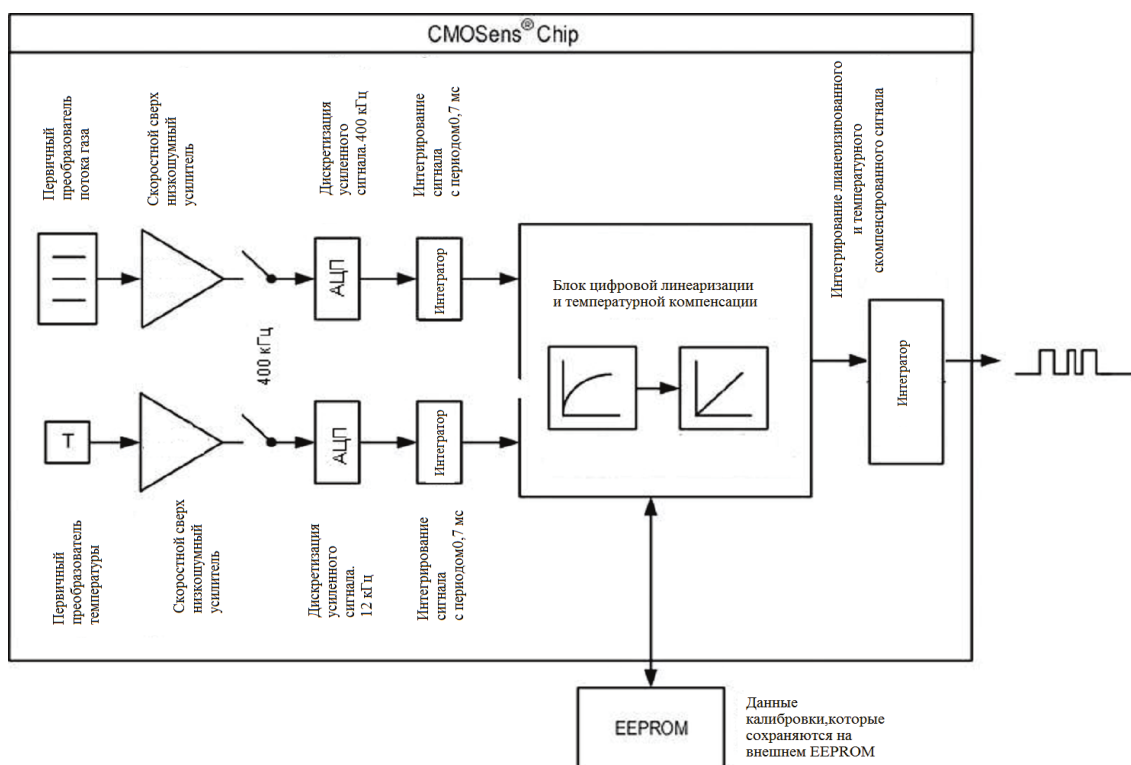


Рисунок 1.12 - Функціональна схема чіпа CMOSens® [3]

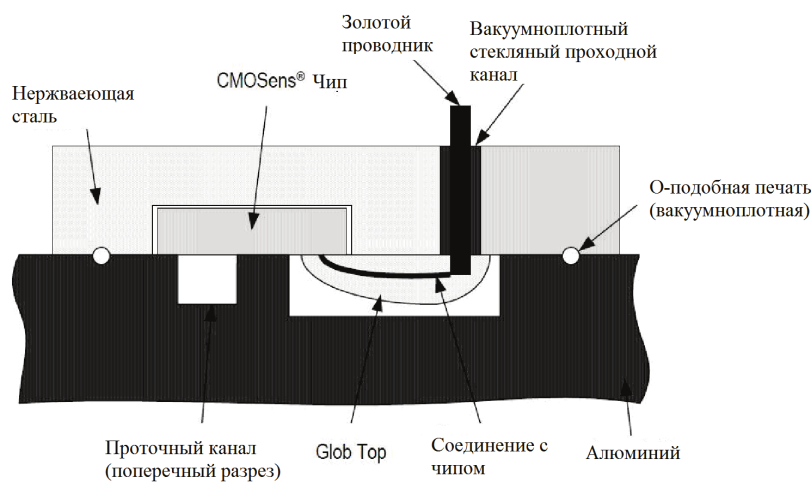


Рисунок 1.13 - Структура первинного перетворювача на основі чіпа

CMOSens®[3]

Датчики серій SFC3000 і SFC4000, крім високочутливих елементів, містять в собі функціональний модуль інтерфейсу. Розроблена вимірювальна система

забезпечує 10-кратне підвищення швидкості вимірювання (150 мс) і значно більш високу точність, завдяки інтеграції теплових датчиків потоку на кремнієвому чіпі CMOSens®, що є значним досягненням у розвитку технології вимірювання витрати.

## РОЗДІЛ 2

### Визначення основних параметрів газу

#### 2.1 Спосіб визначення густини газів.

Відомий спосіб вимірювання густини газів шляхом визначення інтенсивності теплообміну між елементом, що нагрівається та газом [Kenzo Kitamura and Tetsuo Miura. Humidity Sensor for Absolute Humidity Measurement and its Applications. Proc.1<sup>st</sup> Sensor Symposium, 1981, pp.119-123], в котрому використовують мікроскопічних розмірів елемент для визначення густини газу (абсолютної вологості) за теплопровідністю газу. Через елемент пропускають електричний струм, котрий розігріває його. Густину визначають по градуйованій кривій, котра представляє собою залежність потужності, що розсіюється, від температури розігріву та густини газу. В якості теплочутливого елементу, що нагрівається, використовують металічний терморезистор з тонкого платинового дроту або тонкої плівки на тонкій діелектричній підкладці.

В цьому способі використовують залежність теплопровідності від маси молекул (середньої швидкості руху молекул  $v$  від маси та температури газу). Проте, теплопровідність газу  $\lambda$  також залежить і від теплоємності одиниці об'єму  $C_v$  та від середньої довжини вільного пробігу молекул  $l$  :

$$\lambda = \frac{1}{3} C_v \cdot v \cdot l \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  - теплопровідність газу;

$C_v$  - теплоємність;

$v$  - середньої швидкості руху молекул ;

$l$  - середня довжини вільного пробігу молекул.



Коли збільшується концентрація молекул в об'ємі на теплопровідності це може не відбиватись, оскільки зі збільшенням питомої теплоємності одночасно зменшується довжина вільного пробігу молекул. Це призводить до того, що залежність теплопровідності від густини, при деяких температурах, може мати максимум, тобто ця залежність неоднозначна. На удосконалення цього методу направлені відомі способи, в яких для зняття неоднозначності вимірюється також і теплоємність газу.

Для прототипу будемо розглядати спосіб виміру густини газу за допомогою визначення теплофізичних характеристик газу – теплоємності та теплопровідності в мікроскопічних об'ємах, а саме по теплообміну через газ між нагріваним елементом та близько розташованим від нього тепловим сенсором по стаціонарній та нестаціонарній складовій теплообміну одночасно. В цьому способі через нагріваний елемент пропускають електричний струм в імпульсному режимі з амплітудою та тривалістю імпульсу струму такою, щоб і постійна і змінна складові температури досягали теплового сенсора. Теплопровідність газу визначають по постійній складовій температури сенсора, теплоємність по змінній складовій температури сенсора, а густину визначають по теплопровідності та теплоємності газу за емпіричною формулою.

Визначення густини газу вирішується тим, що у способі наведеного в пункті 2.1 вимірювання густини газів шляхом визначення теплообміну між нагріваним елементом та газом, в якому пропускають електричний струм через нагріваний елемент, *новим є те, що* пропускання електричного струму проводять в періодичному режимі за гармонійним законом, вимірюють зсув фази коливання температури газу на відстані  $d$  від нагріваного елемента по відношенню до фази коливання температури нагріваного елемента, а густину визначають за формулою (2.2).

$$\rho = A \frac{\sqrt{T}}{\omega} \cdot \left( \frac{\Delta \varphi}{d} \right)^2, \quad (2.2)$$

де  $T$  - температура газу;

$\omega$  - частота коливань температури;

$\Delta\phi$  - зсув фази коливань температури на відстані  $d$ ;

$A$  – константа;

$l$  - середня довжина вільного пробігу молекул.

Принцип вимірювання густини газів, що пропонується, заснований на залежності швидкості розповсюдження температурних хвиль в газі від його густини. Відомо, що середня довжина вільного пробігу молекул газу  $l$  обернено пропорційна числу молекул в одиниці об'єму  $n$  та ефективному перерізу зіткнень  $\sigma$  молекул газу (2.3).

$$l = \frac{1}{(\sigma \cdot n)} \quad (2.3)$$

де  $l$  - середня довжина вільного пробігу молекул газу;

$n$  - число молекул в одиниці об'єму;

$\sigma$  - ефективний переріз зіткнень;

Оскільки коефіцієнт теплопровідності  $D$  визначається довжиною вільного пробігу молекул  $l$  та середньою швидкістю молекул газу  $v$ , а саме за формулою (2.4)

$$D = \frac{1}{3} \cdot v \cdot l \quad (2.4)$$

де  $v$  - середня швидкість молекул газу;

$l$  - середня довжина вільного пробігу молекул газу;

Швидкість молекул газу можна розрахувати по формулі (2.5).

$$v = \left( \frac{3kT}{m} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.5)$$

де  $k$  - стала Больцмана;

$T$  - температура газу;

$m$  - маса молекул;

То, беручи це до уваги отримаємо розширену формулу для розрахунку температуропровідності  $D$ :

$$D = \frac{1}{3 \cdot \sigma \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \quad (2.6)$$

де  $\sigma$  - ефективний переріз зіткнень;

$n$  - число молекул в одиниці об'єму;

$k$  - стала Больцмана;

$T$  - температура газу;

$m$  - маса молекул.

Виходячи з формули (2.6) можна визначити середню масу молекул  $m$  помножену на  $\sigma^2$ .

$$m \cdot \sigma^2 = \frac{kT}{3 \cdot (D \cdot n)^2}, \quad (2.7)$$

Оскільки  $\sigma$  визначається геометричними розмірами молекули, а розміри молекули визначаються її масою, то можна вважати, що в рівнянні (2.7) ліва частина є функцією тільки маси молекули. Аналіз показує, що залежність квадрату поперечного перерізу молекули від її маси  $\sigma^2(m)$  є функцією (2.8), близькою до лінійної.

$$\sigma^2 = a \cdot m, \quad (2.8)$$

де  $a$  - коефіцієнт з розмірністю  $\text{м}^4/\text{кг}$ .

Наприклад, відношення квадрату площі перерізу молекули гелію (молекулярна маса 4, ефективний діаметр молекули становить  $2,18 \cdot 10^{-10} \text{м}$ ) [Шебалин О.Д. Молекулярная физика. М.: Высш.школа, 1978] до її молекулярної маси з точністю до 3% співпадає з таким відношенням для молекули кисню (ефективний діаметр молекули  $3,64 \cdot 10^{-10} \text{м}$ , молекулярна маса 32), хоча маси цих молекул відрізняються у вісім раз. Таким чином в лівій частині рівняння (2.7) ми маємо функцію, котра пропорційна  $m^2$ , тому середню масу молекул можемо визначити як корінь квадратний з правої частини рівняння (2.7) з поправкою на коефіцієнт.

$$m = A \frac{\sqrt{T}}{D \cdot n}, \quad (2.9)$$

$$\text{де } A = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{a}}, [A] = \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м} \cdot \sqrt{\text{К}}};$$

Оскільки густина газу  $\rho$  визначається як добуток середньої маси молекул  $m$  на кількість молекул в одиниці об'єму  $n$  :  $\rho = m n$ , то густину газу можна записати, підставивши замість маси вираз (4), як:

Оскільки густина газу  $\rho$  визначається як добуток середньої маси молекул  $m$  на кількість молекул в одиниці об'єму  $n$ , то густину газу можна записати, підставивши замість маси вираз (2.9), як:

$$\rho = A \frac{\sqrt{T}}{D}, \quad (2.10)$$

Таким чином, для визначення густини газу достатньо визначити температуропровідність  $D$  та температуру  $T$  газу (при попередньо визначеному коефіцієнту  $A$ ). Температуропровідність можна визначити за допомогою методу температурних хвиль. Якщо температура на поверхні нагріваного елемента змінюється за законом (2.11):

$$T(t) = T_0 e^{j\omega t} \quad (2.11)$$

де  $t$  - час;

$\omega$  - частота температурних коливань;

$k$  - стала Больцмана;

$T$  - температура газу;

$m$  - маса молекул.

Тоді на відстані  $d$  від поверхні елемента при дифузійному переносі тепла температура газу визначається виразом:

$$T(t, d) = T_0 e^{-d\sqrt{\frac{\omega}{2D}}} \cdot e^{j\left(\omega t - d\sqrt{\frac{\omega}{2D}}\right)}, \quad (2.12)$$

де  $d$  - відстані від поверхні елемента.

Таким чином, в стаціонарному режимі зсув фази температурних коливань визначається виразом:

$$\Delta \phi = d \sqrt{\frac{\omega}{2D}} \quad (2.13)$$

Виведемо значення  $D$  із формули 2.13 наступним чином:

$$D = \left( \frac{\omega}{2} \right) \cdot \left( \frac{d}{\Delta \phi} \right)^2 \quad (2.14)$$

Для визначення гстини газу підставимо в формулу 2.10 значення  $D$ , що було розраховано формулою 2.14.

$$\rho = A \frac{\sqrt{T}}{\omega} \left( \frac{\Delta \phi}{d} \right)^2 \quad (2.15)$$

Спочатку визначають константу  $A$ , якщо вона невідома з попередніх вимірювань. Для цього розміщують в газі з відомою густиною  $\rho_o$  нагріваний елемент, пропускають через нього струм, що змінюється за гармонійним законом  $I = I_o(1 + \sin(\omega t))$ , вимірюють температуру газу та частоту коливань струму. Відносно коливань струму вимірюють фазу коливань температури нагріваного елемента  $\phi_1$  та фазу коливань температури газу  $\phi_2$  на відстані  $d$  від нагріваного елемента за допомогою мало інерційного термометра. Після визначення різниці фаз, визначають константу  $A$  за формулою (2.16).

$$A = \frac{\rho_o \omega}{\sqrt{T}} \cdot \left( \frac{d}{\Delta \phi} \right)^2, \quad (2.16)$$

де  $\rho_o$  – відома густина газу;

$\omega$  - частота температурних коливань;

$\Delta\phi$  - зсув фази коливань температури на відстані  $d$ .

Потім підставляємо відоме вже значення параметру  $A$  формулу для розрахунку густини (2.15).

## 2.2 Спосіб визначення потоку газів

Вже є відомі методи вимірювання потоку газів за допомогою ультразвуку, де визначають потік за різницею часу розповсюдження ультразвукової хвилі за потоком та проти нього, проте вони не підходять для трубопроводів малого діаметра та для малих потоків, крім того прилади, що реалізують ці методи, мають великі габарити.

Також є відомий спосіб вимірювання потоку газів шляхом визначення інтенсивності теплообміну між елементом, що нагрівається та газом, що рухається, в котрому використовують мікроскопічних розмірів елемент, отриманий за допомогою мікроелектронної технології. Через елемент пропускають електричний струм, що розігрівляє його. Потужність, що розсіюється, автоматично підбирають таким чином, що величина розігріву підтримується постійною. Потік визначають за допомогою градуовальної кривої, котра представляє собою залежність потужності, що розсіюється, від потоку газу. В якості термочутливого елементу, що нагрівається, використовують металевий терморезистор. Такий спосіб має обмежений діапазон вимірюваних потоків, низьку чутливість в області малих потоків та нелінійну характеристику перетворення. До недоліків цього способу слід віднести незручність та значну похибку при визначенні значення потоку по градуовальному графіку чи таблиці.

Але в роботі ми розглянемо спосіб вимірювання потоку газів шляхом створення електричним струмом періодичних коливань температури нагрівача, що діє на газ чи рідину, та визначення зсуву фази коливань температури на відстані  $d$  від нагрівача відносно коливань температури нагрівача. В цьому способі через

нагрівач у вигляді металевої стрічки пропускають струм від генератора електричних коливань та за допомогою термоелектричного сенсора фіксують фазу температурних коливань на деякій відстані від нагрівача. Фазовим детектором вимірюють зсув фази між коливаннями температури нагрівача та теплового сенсора, причому фазовий зсув залежить від величини потоку.

Недоліком цього способу є нелінійна залежність зсуву фази коливань від величини потоку газу чи рідини, що призводить до того, що чутливість швидко падає зі зростанням величини потоку. Крім того, зсув фази коливань температури залежить від теплофізичних властивостей газу чи рідини, тому для різних середовищ необхідно підбирати оптимальну частоту коливань температури [5].

Задача визначення потоку газу вирішується тим, що у способі вимірювання потоку газів, який включає створення електричним струмом періодичних коливань температури нагрівача, що діє на газ, визначення параметрів теплообміну через газове середовище між нагрівачем та тепловим сенсором на відстані від нагрівача. Але в цьому випадку сигнал на тепловому сенсорі порівнюють з опорним сигналом, якщо сигнал сенсора менший опорного сигналу, нагрівач вмикають, коли сигнал теплового сенсора дорівнює або перевищує опорний сигнал, нагрівач вимикають, вимірюють частоту релаксаційних коливань, що виникають, а потік газу визначають за формулою:

$$\rho = A(\omega - \omega_0), \quad (2.17)$$

де  $\omega$  - частота автоколивань температури нагрівача при потоці що вимірюється;

$\omega_0$  – константа, котра дорівнює частоті автоколивань температури нагрівача при нульовому потоці;

$A$  - константа, котра визначається геометрією каналу та відстанню між нагрівачем та тепловим сенсором.



Висока точність та зручність методу обумовлена тим, що потік визначають по формулі, в котрій вимірювана величина лінійно залежить від частоти коливань, до формули входять величини, що можуть бути виміряні з високою точністю (частоти  $\omega$  та  $\omega_0$ ), та константи, що визначаються геометрією ( $A$ ,  $d$ ). Слід зауважити, що коливання електричного струму мають не гармонійну форму типу синусоїди, а коливання типу меандр, що забезпечує більшу завадостійкість.

Даний принцип вимірювання потоку газів, заснований на залежності швидкості розповсюдження температурних хвиль в газі чи в іншому середовищі від швидкості руху газу чи середовища відносно сенсора. Відомо, що час розповсюдження температурної хвилі в нерухомому середовищі (потік дорівнює нулю) від нагрівача до сенсора визначається відстанню  $d$  між ними та швидкістю протікання дифузії тепла  $C$ :

$$t_0 = \frac{d}{C}, \quad (2.18)$$

де  $d$  - відстань від нагрівача до сенсора;

$C$  – швидкість протікання дифузії тепла.

Цей проміжок часу визначає період релаксаційних коливань, що виникають за рахунок запізнення теплового зв'язку між нагрівачем та сенсором ( $T_0 = 2$ ):

$$t_0 = \frac{2d}{C} \quad (2.19)$$

А також цей проміжок часу визначає частоту коливань:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{C}{2d} \quad (2.20)$$

Коли середовище рухається зі швидкістю  $V$ , час розповсюдження температурної хвилі зменшується:

$$t_p = \frac{d}{C + V}, \quad (2.21)$$

де  $V$  - швидкість руху газу (середовища);

А частота коливань збільшиться:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{C + V}{2d} \quad (2.22)$$

При цьому зміна частоти визначається виразом:

$$\omega - \omega_0 = \frac{C + V}{2d} - \frac{C}{2d} = \frac{V}{2d} \quad (2.23)$$

Тобто зміна частоти визначається швидкістю переміщення середовища відносно сенсора. Оскільки величина потоку визначається швидкістю потоку та площею поперечного перерізу  $S$  каналу:

$$\rho = V \cdot S, \quad (2.24)$$

де  $\rho$  - величина потоку;

$V$  - швидкість потоку;

$S$  - площа поперечного перерізу.

Тому реальна константа  $A$  може дещо відрізнятися від величини  $2Sd$ . Тому для врахування реальних умов константу  $A$  визначають експериментально, шляхом градуювання відомого потоку.

На рисунку (2.1) зображено схему пристрою для реалізації запропонованого способу.

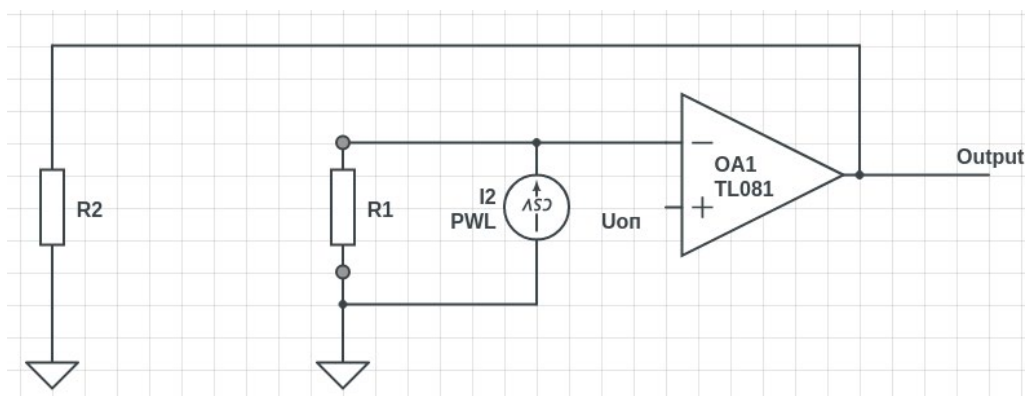


Рисунок 2.1 - Схема вимірювання частоти зсуву

Спочатку визначають константу  $\omega_o$ , якщо вона невідома з попередніх вимірювань. Для цього в нерухомому середовищі (з нульовим потоком) за допомогою нагрівача R2 збуджують теплову хвилю. Через проміжок часу  $t_0$  тепла хвиля через середовище досягає теплового сенсора R1. За допомогою теплового сенсора R1 відбувається перетворення температури середовища в електричний сигнал, котрий подають на компаратор-інвертор OA1, де сигнал сенсора порівнюють з опорним сигналом  $U_{оп}$  [10].

Коли сигнал на сенсорі більший або рівний опорному сигналі  $U_{оп}$ , на виході інвертора формується низький рівень напруги, котрий подають на нагрівач R2, що призводить до вимкнення нагрівача і формування фази спаду температури в тепловій хвилі. Коли спад температурної хвилі досягне теплового сенсора R1 і його температура впаде нижче рівня, що відповідає сигналу  $U_{оп}$ , на виході інвертора сформується високий рівень напруги, котрий подають на нагрівач, що призводить до вмикання нагрівача і збудження нового фронту теплової хвилі, тобто цикл повторюється. В результаті виникають релаксаційні коливання. Вимірюють частоту автоколивань, котра визначає константу  $\omega_o$ .

Потім визначають константу A. Для цього створюють відомий потік R1 і умови для автоколивань та вимірюють частоту автоколивань R2, що відповідає цьому потоку. Константу A визначають за формулою (2.25).

$$A = \frac{\rho_1}{\omega - \omega_0} \quad (2.25)$$

Якщо константи  $\omega_o$  та  $A$  відомі, то величину потоку  $\rho$  визначають наступним чином: за допомогою нагрівача  $R2$  збуджуючи теплову хвилю. Через проміжок часу  $t$ , що залежить від величини потоку, тепла хвиля досягає теплового сенсора  $R1$ . Тепловим сенсором  $R1$  перетворюють температуру середовища в електричний сигнал і подають на компаратор-інвертор, де сигнал сенсора порівнюють з опорним сигналом. Коли сигнал сенсора є рівним або перевищує опорний сигнал  $U_{оп}$ , на виході інвертора формується низький рівень напруги, котрий подають на нагрівач  $R2$ , що призводить до вимкнення нагрівача і формування фази спаду температури в тепловій хвилі.

Коли спад температурної хвилі, прискорений потоком, досягне теплового сенсора  $R1$  і його температура впаде нижче рівня, що відповідає сигналу  $U_{оп}$ , на виході інвертора сформується високий рівень напруги, котрий подають на нагрівач, що призводить до вмикання нагрівача і збудження нового фронту теплової хвилі, тобто цикл повторюється. В результаті виникають релаксаційні коливання, частота котрих залежить від величини потоку.

Вимірюють частоту автоколивань та визначають величину потоку за формулою (2.17)

Для отримання максимальної точності в широкого діапазону вимірюваних потоків тепловий сенсор та нагрівач мають мати мінімальну теплоємність та геометричні розміри при максимальному відношенні площі до об'єму, щоб не вносити похибки за рахунок теплової інерційності.

### 2.3 Визначення тиску газів

Є відомі способи вимірювання тиску газів шляхом визначення інтенсивності теплообміну між елементом, що нагрівається та газом, в котрому використовують елемент мікроскопічних розмірів, отриманий за допомогою мікроелектронної технології. Через елемент пропускають електричний струм, котрий розігріває його. Потужність, що розсіюється, автоматично підбирають таким чином, що величина

розігріву підтримується постійною. Тиск визначають по градуйованій кривій, котра представляє собою залежність потужності, що розсіюється, від температури розігріву. В якості термочутливого елементу, котрий реєструє теплові хвилі, використовують металевий терморезистор на тонкій діелектричній плівці. Щоб збільшити діапазон вимірюваних тисків (в діапазон високих тисків), використовують елемент мікроскріпних розмірів, для забезпечення різкого градієнту температури біля його поверхні. Цей метод має обмежений діапазон вимірювальних тисків, до кількох атмосфер, це відбувається через те, що довжина вільного пробігу молекул газу при таких тисках досягає величини 10 - 100 нм, а мінімальний розмір елементу складає приблизно визначається можливостями технології виготовлення. Недоліки цього методу це незручність та значна похибка при визначенні значення тиску по градуйованому графіку чи таблиці [10].

В роботі ми розглянемо спосіб вимірювання тиску газів шляхом , таким яким і вимірювали потік газу в розділі 2.2. Вимірювання тиску газів відбувається шляхом визначення теплообміну між нагріваним елементом та газом, де в імпульсному режимі, через нагрівальний елемент пропускають електричний струм з тривалістю імпульсу струму меншою за характерний час встановлення стаціонарного розподілу температури в газі при стрибкоподібній зміні температури нагрівального елементу, вимірюють залежність температури розігріву від розсіювальної потужності і по градуйованій залежності визначають тиск газу.

Заданий спосіб вимірювання тиску газів, заключається в періодичному нагріву елементу за гармонійним законом і вимірювання зсуву фази коливання температури газу на фіксованій відстані від нагріваного елементу, тиск визначають по формулі (2.26) і забезпечують більш високу точність за рахунок зменшення похибки.

$$p = AT \cdot \frac{\Delta \varphi^2}{d^2} \quad (2.26)$$

де  $\Delta \varphi$ - зсув фази коливань температри на відстані  $d$ ;

$T$  - період коливань температури;

$A$  - константа, котра визначається властивостями газу.

Висока точність методу обумовлена тим, що тиск визначають по формулі в якій є величини, що можуть бути виміряні з високою точністю наприклад як період коливань  $T$  та зсув фаз коливань  $\Delta \varphi$ , та константи, що визначаються геометрією і властивостями газу, відстань від нагрівача і до приймача  $d$  і константа  $A$ , а не по градуйованій кривій.

Принцип вимірювання тиску газ в середовищі, що пропонується заснований на залежності швидкоті розповсюдження температурних хвиль в середовищі від тиску газу.

Відомо, що довжина вільного пробігу молекул газу обернено пропорційна числу молекул в одиниці об'єму, тобто густині, котра визначається тиском газу. Оскільки коефіцієнт теплопровідності  $D$  визначається довжиною вільного пробігу молекул, то він також має обернено пропорційну залежність від тиску:

$$D \sim \frac{1}{p} \quad (2.27)$$

Якщо температура на поверхні нагрівального елемента змінюється по закону (2.11), то на відстані  $d$  від поверхні елемента при дифузійному переносі тепла температура газу буде визначатися по формулі (2.12). В стаціонарному режимі зсув фази температурних коливань визначається виразом (2.13).

Формула для розрахунку тиску (2.26) отримується підстановкою оберненої величини тиску  $p$  з формули (2.27) в формулу (2.13).

Спосіб здійснюється наступним чином. Спочатку якщо константа  $A$  невідома то її визначають. Для цього розміщують в газі з відомим тиском  $p_0$  нагріваний елемент, пропускають через нього струм, що змінюється за гармонічним законом (2.28), вимірюють фазу коливань температури нагрівного елемента  $\varphi_1$ , та фазу коливань температури газу  $\varphi_2$  на відстані  $d$  від нагрівного елемента за допомогою малоінерційного термометру.

$$I = I_0 \cdot \left( 1 + \sin \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} \right) \right) \quad (2.28)$$

Після визначення різниці фаз (2.29) визначають константу  $A$  за формулою (2.30).

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2.29)$$

$$A = p_0 \cdot \frac{d^2}{T \cdot \Delta \varphi^2}, \quad (2.30)$$

де  $\Delta \varphi$  - зсув фази коливань температури на відстані  $d$ ;

$T$  - період коливань температури;

$p_0$  - відомий тиск газу.

Якщо константа  $A$  відома, то тиск розраховують наступним чином. Розміщують нагрівальний елемент в газі, пропускають через нього електричний струм, що змінюється за гармонічним законом (2.28), так само ж вимірюють фазу коливань температури нагрівального елемента  $\varphi_1$ , та фазу коливань температури газу  $\varphi_2$  на відстані  $d$  від нагрівального елемента. І вже після визначення різниці фаз, визначають тиск газу по формулі (2.26).

## 2.4 Висновки до розділу

Такі параметри як густина, потік і тиск можна визначити по відносно простим емпіричним формулам, що робить цей метод простішим і це є перевагою. Недоліком є те що в до цих формул входить багато параметрів які потрібно вимірювати і розрахувати, що призводить до зменшення точності.

Також перевагою є те, що ці три параметри можна визначити провівши одну і ту ж схему вимірювання і підставити визначені параметри в різні формули. Визначною відмінністю запропонованої схеми вимірювання є те, що реєструється

не теплові втрати як в методах запропонованих в розділі 1, а зсув фази теплових коливань. Тобто відбувається збудження теплових хвиль термогенератором, подаючи на нього вже не постійний струм, а змінний. Такий спосіб дозволяє збільшити діапазон вимірювальних тисків, без втрати точності вимірювання.



## РОЗДІЛ 3

### MEMC сенсор газу

#### 3.1 Основні теоретичні положення MEMC-технології

Сьогодні розрізняють два типи мікросистем на основі MEMC (рис.1):

- а) гібридні, що складаються з MEMC-пристроїв і окремої мікросхеми, які розміщені на загальній кремнієвій, скляній або кварцовій підкладці;
- б) монолітні, що представляють собою стандартну КМОП-мікросхему з MEMC-елементами, виконаними на одному кристалі. Монолітні структури дозволяють поліпшити характеристики MEMC, зменшити витрати виробництва, корпусування і тестування, оскільки етапи формування MEMC і мікросхеми об'єднані. Безліч схемних компонентів завдяки об'єднанню за допомогою промислових технологій MEMC і мікросхеми можуть бути замінені одним мініатюрним компонентом.

На сьогодні MEMC виготовляються за технологіє об'ємної, або поверхневої обробки.

**Об'ємна мікрообробка** - це розширена мікроелектронна технологія, що дозволяє виготовляти тривимірні MEMC на кремнієвій підкладці за допомогою анізотропного травлення кремнію з використанням в якості масок плівок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , хрому, золота. Недолік цього методу - залежність геометрії мікроструктури від кристалічної структури підкладки. Тому для формування MEMC-системи проводять або глибоке анізотропне сухе травлення (наприклад, реактивне травлення газовою плазмою), або з'єднують дві підкладки (кремнієву з кремнієвою або кремнієву зі скляною), на кожній з яких виготовлена MEMC-структура і мікросхема. Це дозволяє створювати більш складні тривимірні MEMC-елементи.

Зараз об'ємна технологія в багатьох випадках використовується для виготовлення MEMC-пристроїв, що входять в дво- або навіть трьохкристальні

конструкції. Двокристальна конструкція містить кристал з МЕМС-датчиком, сигнал якого обробляє КМОП-схема, що виконує функції захисту і зворотного зв'язку. Таке виконання дозволяє спростити виробництво МЕМС-пристрої і швидше реагувати на вимоги замовника.

**Поверхнева мікрообробка** дозволяє з меншими зусиллями створювати більш складні, багатокомпонентні інтегровані МЕМС-структури, що формуються в шарах жертвовного матеріалу, і стала значним технологічним досягненням. Підкладка в основному слугує механічної основою, на яку осідають шари структурного і жертвовного матеріалу. Жертвовний матеріал після створення необхідної структури видаляється за допомогою хімічного розчинника, звільняючи рухливий елемент. Найбільш широко в якості структурного матеріалу використовується полікремній, як жертвовний матеріалу -  $\text{SiO}_2$ . Це обумовлено тим, що регулюючи температуру високотемпературного відпалу полікремнію, можна отримувати вільні від механічної напруги, або навпаки, механічно напружені шари. Механічні напруги двоокису кремнію складно контролювати. Ось чому  $\text{SiO}_2$  використовується як жертвовний.

Після створення МЕМС-структури до неї за допомогою стандартної напівпровідникової технології можуть бути додані електронні пристрої. Це дозволяє формувати МЕМС-структуру в центрі кристала, електронні компоненти мікросхем - по його периферії і захистити МЕМС кристалом-ковпачком. Саме такий підхід використаний при виробництві МЕМС і інтегрованих МЕМС-датчиків (iMEMS), багато-осьових акселерометрів, висувних (pop-up) мікродзеркал, тобто так званих систем на кристалі (System-on-Chip, SoC).

Одна з популярних технологій формування МЕМС-структур передбачає послідовне проведення процесів літографії, гальванопокриття і мікроліття. Ця технологія, відома під назвою LIGA (Lithographie, Galvanoformung und Abformung), дозволяє створювати тривимірні структури з високим аспектним співвідношенням, використовуючи різноманітні матеріали - метали, полімери, кераміку, скло.

Для виготовлення сучасних мініатюрних електронних пристроїв перспективна технологія монтажу бескорпусних кристалів на друкованій платі

(Chip-on-Board, CoB). Поєднання CoM- і CoB-технологій забезпечує більшу гнучкість і кращу пристосовність виробничого процесу до конструктивних змін, надаючи більше можливостей контролю і виправлення помилок.

Таким чином, сучасні MEMC виготовляються за допомогою тих же процесів, що і мікросхеми. Тим не менш, деякі процеси і їх послідовність відрізняються, і ця різниця збільшується. Сьогодні MEMC об'єднують з нанoeлектромеханічними системами (nanoelectromechanical system, NEMS), що дозволяє розширювати їх застосування, перш за все в біосистемах, радіочастотних пристроях і акселерометрах. В результаті на зміну традиційно використовуваним в напівпровідниковій технології операціям фотолітографії і травленню приходить більш дешевий метод - наноімпринтлітографія. Ця перспективна технологія передбачає занурення наношаблону в м'який шар тонкої полімерної плівки, нанесеної на фоторезист, який потім затвердіває під дією тепла і тиску (гаряче тиснення) або УФ-випромінювання (холодне тиснення) з збереженням форми надрукованого малюнка. Отримана плівка може бути використана як кінцева структура, так і як наношаблон для формування тривимірних структур. Наноімпринтлітографія простіша у виконанні, ніж традиційна фотолітографія, не вимагає складної оптики, застосування небезпечних хімічних речовин, потужних джерел живлення, дозволяє працювати з широким діапазоном фоторезистів і створювати тривимірні структури. Завдяки стрімкому розвитку ця технологія вже дозволяє отримувати малюнки з мінімальними розмірами менше 10 нм. Вона вже вийшла за стіни лабораторій. Доступне обладнання для тиснення, вирівнювання та суміщення шарів з розширенням порядку 20 нм, яке в основному обмежена лише розмірами шаблонів. У майбутньому очікується широке застосування наноімпринтлітографії.

При виробництві MEMC-структур актуально сухе глибоке реактивне іонне травлення (DRIE) на глибину в декілька сотень мікрон. Все це, безумовно, значно відрізняє виробництво MEMC від традиційних технологічних процесів мікросхем, причому цей процес менше впливає на ціну мікросхеми, ніж на ціну MEMC.

На відміну від мікросхем, корпусування яких не має першорядного значення при проектуванні системи, корпусування МЕМС-структур відіграє важливу роль в процесі виробництва, впливаючи на ціну виробу. Так, досить часто через несумісність матеріалів і технологічних процесів виготовлення датчиків, актюаторів і електронних схем доводиться інтегрувати всі компоненти в гетерогенну систему на загальній підкладці (гібридна інтеграція). Зараз в нанотехнології вивчається можливість реалізації процесу самозбірки, котра також відрізняється від традиційних методів мікроелектроніки. Паралельно розвиваються два типи наноелектронних приладів - інтегровані з КМОП-мікросхемами і які не розраховані на сумісність з ними.

Відбулася ситуація, в результаті якої вартість корпусування, збірки і тестування МЕМС складає більш ніж 50% (або навіть 60-80%) вартості системи. Звичайно, в залежності від призначення пристрою цей внесок варіюється. Цілком зрозумілі, наприклад, підвищення вимоги до корпусування МЕМС-пристроїв, які розміщуються в хімічно активному середовищі (наприклад, датчиків тиску паливного бака, масла двигуна або кров'яного тиску людини). В цьому випадку кремнієва підкладка повинна бути добре захищена.

Очевидно, за вимогами до корпусування МЕМС, призначені для біосистем, радикально відрізняються від МЕМС, які використовуються в мобільних телефонах.

Можна виділити наступні класи корпусів МЕМС-елементів:

- а) повністю герметичний (зазвичай вакуумний, керамічний, скляний, металевий);
- б) негерметичний пластиковий;
- в) близький до герметичного (Near-Hermetic Package, NHP);
- г) сумісний за розмірами з підкладкою (wafer-level packaging, WLP) із застосуванням пасивного ковпачка (без електричних з'єднань);
- г) повністю сумісний за розмірами з підкладкою (Full WLP) із застосуванням ковпачка з електричними сполуками.

Завдяки малим розмірам, підвищеним характеристикам, швидкому просуванню на ринок з точки зору зниження вартості МЕМС, найбільш перспективний WLP-корпус. Поєднання методу створення внутрішньокремнієвих з'єднань (Through-Silicon Vias, TSV) і WLP-корпусів, а також перехід від обробки пластин діаметром 150 мм до 200 мм пластин дозволяють корпусовані близько 5 тис. датчиків, що формуються на одній пластині.

### 3.2 Технологічні цикли

Взагалі кажучи, під мікросистемой розуміється інтеграція ряду різних технологій (MEMS, КМОП, оптичною, гідравлічне та ін.) в одному модулі. Наприклад, під технологіями виготовлення MEMS-пристроїв для СВЧ-застосувань (катушки індуктивності, варактори, комутатори, резонатори) маються на увазі традиційні технологічні цикли виготовлення інтегральних схем, адаптовані для створення тривимірних механічних структур, скажімо, об'ємна мікрообробка, поверхнева мікрообробка і так звана технологія LIGA.

Кремнієва об'ємна мікрообробка включає технологію глибинного об'ємного травлення. При використанні такого процесу об'ємна структура виходить всередині підкладки завдяки її анізотропним властивостям, тобто різній швидкості травлення кристала в залежності від напрямку кристалографічних осей. Об'ємна структура може нарощуватися, що і відбувається, коли кілька підкладок сплавляються і утворюють вертикальні зв'язку на атомарному рівні.

При поверхневій мікромеханічній обробці тривимірна структура створюється послідовним накладенням основних тонких плівок і видаленням допоміжних шарів згідно необхідної топології. Перевага даної технології полягає в можливості багаторазового видалення (розчинення) допоміжних шарів без пошкодження взаємозв'язків базових шарів. Її головна особливість в тому, що вона сумісна з напівпровідникової технологією, оскільки для мікрообробки використовується звичайний КМОП-процес.

Технологія LIGA це комбінація рентгенівської літографії, гальванотехніки і пресування (формування). Тут товстий фоторезистивний шар піддається впливу рентгенівських променів (засвічування) з подальшим гальванічним осадженням високопрофільних тривимірних структур. Сутність процесу полягає в використанні рентгенівського випромінювання від синхротрона для отримання глибоких, зі стрімкими стінками топологічних картин в полімерному матеріалі. Випромінювання синхротрона має надмалий кут розходження пучків. Джерелом випромінювання служать високоенергетичні електрони (з енергією більше 1 GeV), що рухаються з релятивістськими швидкостями. Глибина проникнення випромінювання досягає декількох міліметрів. Це обумовлює високу ефективність експонування при малих часових витратах. Вважається, що дана технологія забезпечує найкраще відношення відтворюваної ширини каналу до його довжини (при мінімальних розмірах).

### 3.3 Виготовлення терморезистивного перетворювача

Спосіб виготовлення терморезистивного перетворювача, що полягає в тому, що на підкладку з кремнію формують діелектричну плівку шляхом нанесення шару кремнію товщиною 0,1 мкм і чутливий металевий шар, а також малюнок останнього, і анізотропно травлять підкладку для мікромосту, відмінний тим, що перед нанесення шару нітриду кремнію, здійснюваного парогазовим осадженням в реакторі зниженого тиску, на підкладці термічного окислення кремнію до товщини шару двоокремнія 0,05 - 0,1 мкм утворюють інший шар діелектричної плівки.

Мінімальне значення 0,1 мкм визначається тим, що при менших товщинах плівка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  може бути несучільний, що знижує механічну міцність мембрани і погіршує маскувальні властивості  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Вибір товщини  $\text{Si}_3\text{N}_4$  більше 0,3 мкм призводить до наростання механічної напруги і збільшення термічної маси.

Товщина підслою  $\text{SiO}_2$  в межах 0,05 - 0,1 мкм вибрана з міркувань максимального зниження термічних напруження в плівці  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . При товщині менше

0,05 мкм збільшується нерівномірність плівки і знижується ефект зменшення механічної напруги. При товщині більше 0,1 мкм можливе руйнування діелектричних плівок термічним напруженням в момент перед залишковим натравлюванням  $SiO_2$ . Потім на плівці формують термочутливий елемент. Як термочутливий елемента можна використовувати плівковий терморезистор з Ni, Pt завтовшки 0,1- 0,2 мкм з підслоем Ti, Cr, Ta товщиною 300 - 500 Å.

Після проведення двосторонньої фотолітографії в діелектричній плівці розкривають вікна методом хімічного або плазмохімічного травлення для подальшого локального травлення підкладки. Травлення виробляють із зворотного боку підкладки одним з відомих травників, що забезпечують отримання необхідних структур, наприклад 40% -й водний розчин КОН. Травлення проводиться при температурі 80 - 90 °C. Даний травник повинен бути анізотропним і селективним. Його швидкість травлення кристалічної щільності (100) в кремнії дорівнює 2 мкм / хв, що в 300 - 400 разів перевищує швидкість підтравлення.

Даний спосіб дозволяє отримати тонкі - (0,15 - 0,4) мкм двошарової плівки з  $SiO_2$  і  $Si_3N_4$ , що утворюють діелектричний "Мікроміст" (мембрану) для створення швидкодіючого (мала термічна маса) термочутливого елемента з хорошою тепловою ізоляцією від підкладки і високу механічну міцність, рівномірним розподілом механічних напружень.

Підшар  $SiO_2$  з малим коефіцієнтом термічного розширення знижує механічні напруги в шарі  $Si_3N_4$ , викликані більш високим коефіцієнтом термічного розширення кремнію.

Травлення кремнію зі зворотного боку виключає утворення під плівкою міхурів і зниження виходу придатних виробів з цієї причини, а також небажані подтрави кремнію при малій товщині плівки.

Базова напівпровідникова структура включає мембрану чутливий елемент (SE) та активний термогенератор (H) (див. рис. 3.1). Він залишається ідентичним для реєстрації декількох фізичних параметрів.

Моделювання електротермічних процесів, характерних для конструкцій в MEMS, дозволяє нам давати рекомендації щодо геометрії первинного

перетворювача, оптимального взаємного позиціонування Н і SE та встановлювати основні характеристики приладу.

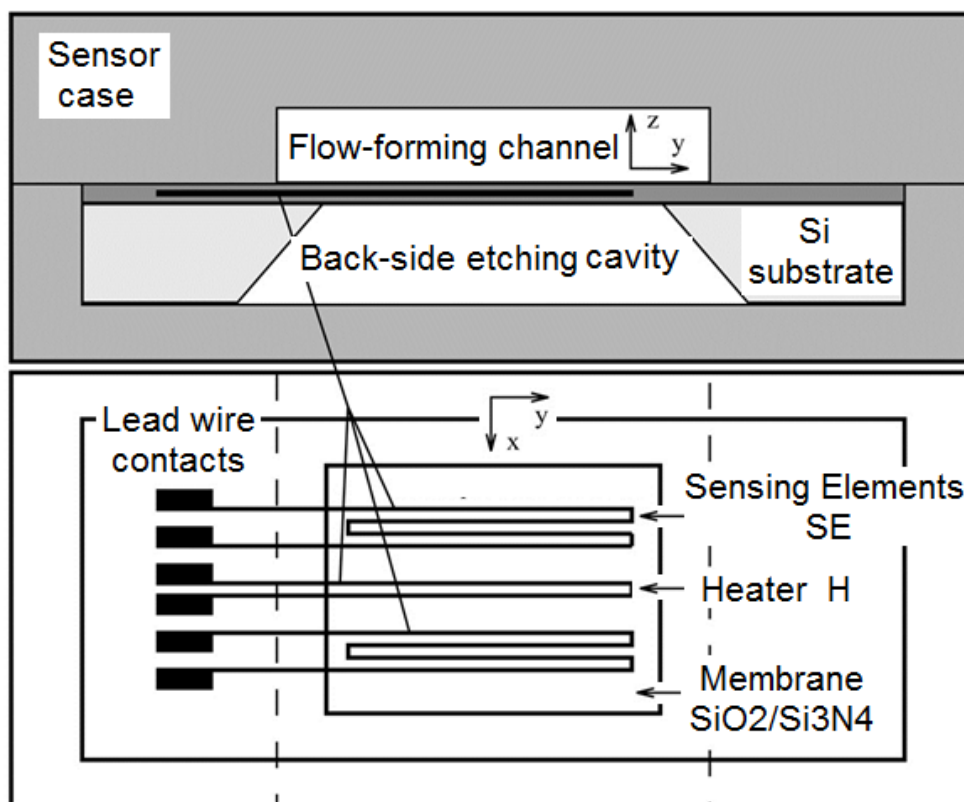


Рисунок 3.1 - Топологія запропонованого датчика [9]

Моделювання процесів у структурі слід вважати успішним, якщо результати, отримані на основі як калориметричного, так і термокондуктометричного методу, включають:

- а) дослідження стаціонарного розподілу температури в потокоутворюючому каналі;
- б) дослідження теплообміну теплогенеруючого елемента мікромоста з аналізованим середовищем у потокоутворюючому каналі прямокутного перерізу.
- в) ми врахували питому енергію обмін між наступними теплообмінними тілами:
  - 1) елементи всередині термоізолюючих системах (TIC);
  - 2) дах і дно потокоутворюючого каналу;



3) потік рідини в каналі.

### 3.4 Залежність зміни температури в площині мембрани

Розширення можливостей багатофункціонального мікроелектронного термореактивного датчика відбувається завдяки певним змінам його режимів роботи. Як приклад наводиться вищезгаданий датчик вимірювання щільності газу, який призначений для визначення питомої ваги вуглеводнів у системах управління процесом згоряння, системах контролю витоків природного газу тощо.

Слід зазначити, що збільшення концентрації молекул в об'ємі на теплопровідність може не відбутися, оскільки зі збільшенням питомої теплоємності одночасно зменшується довжина вільного пробігу молекул.

Це призводить до того, що виникає залежність теплопровідності від щільності в певних діапазонах щільності та температури може мати екстремум, тобто це неоднозначно. По суті, існує вимога до співіснування геометричних розмірів первинного перетворювача із вільним пробігом молекули у робочих діапазонах концентрацій. Крім того, для моделі проникнення теплової хвилі в напівпростір необхідно враховувати дуже значне згасання амплітуди коливань температури в цьому, середовищі відповідно до наступної координатно-часової залежності  $T(x, t)$ :

$$T(x, t) = T_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x\right), \quad (3.1)$$

де  $T_0$  - амплітуда коливань температури нагрівача;

$\omega$  - температура коливання температури;

$a$  - термодифузія;

$x$  - координата нормалі до межі напівпростору.

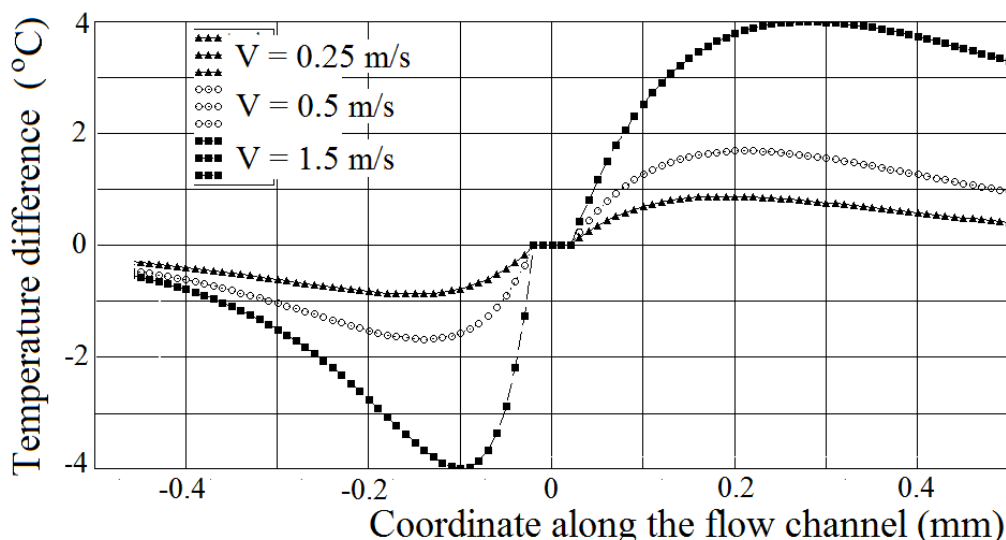


Рисунок 3.2 - Розрахована залежність зміни температури в площині мембрани від лінійної швидкості повітря в каналі, що утворює рідину

Моделювання проникнення теплової хвилі в середовище дає істотно виражений максимум у просторовій залежності зміни амплітуди коливань температури від координати при зміні теплової дифузійності. На рис. 3.3 показані відповідні криві, аналіз яких підтверджує оптимальне використання вимірювальних перетворювачів у характеристиках MEMS з їх власними розмірами порядку десятків - сотень мікрон та власним постійним часом близько декількох мілісекунд. Залежність відносної зміни амплітуди коливань температури (вертикальної осі) від відстані  $x$  від межі в результаті зміни дифузійності

температури від  $a_1 = 2 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{сек}} \right]$  (повітря в нормальних умовах) до  $a_{05} = 10^{-5} \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{сек}} \right]$

для частот  $\omega_1 = 100 \text{ Гц}$ ,  $\omega_2 = 50 \text{ Гц}$ ,  $\omega_3 = 10 \text{ Гц}$  наочно показує наявність оптимального просторового розташування нагрівача та реєструючого перетворювача температури для аналізу характеристик середовища за температурною дифузійністю та похідних його теплопровідності, питомої теплоти та щільності. Особливістю є звуження кривої і як наслідок очікуване збільшення критичності геометричної оптимізації перетворювача зі збільшенням робочої частоти.

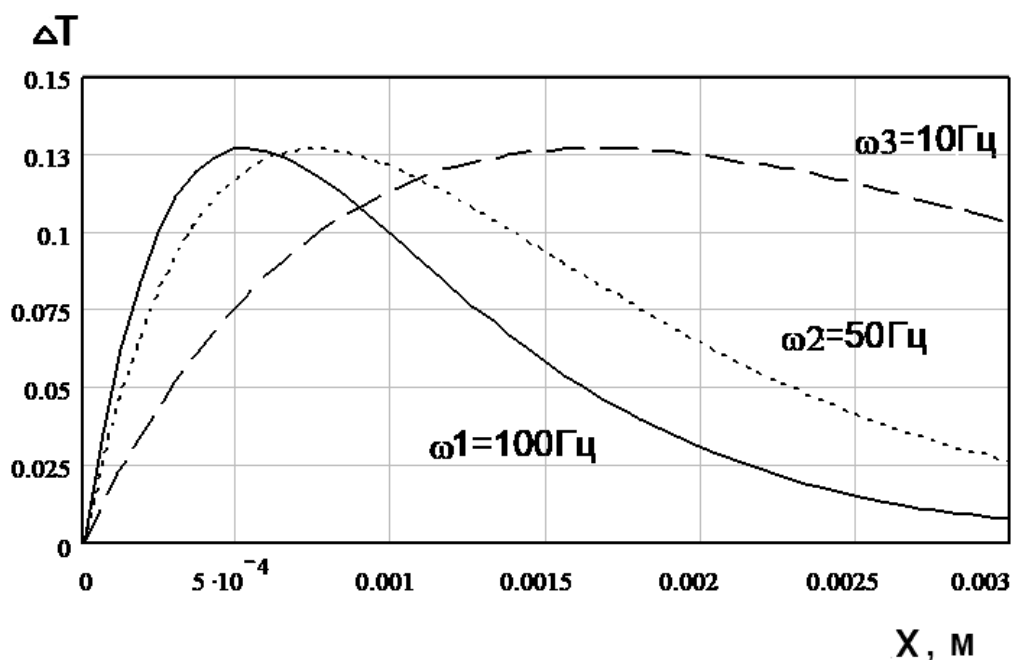


Рисунок 3.3 - Змодельована залежність відносної зміни амплітуди коливань температури  $\Delta T$  від проникнення теплової хвилі в рідину на глибині  $x$  в результаті зміни термодифузійності

Реалізація способу вимірювання щільності газів відбувається шляхом визначення теплообміну між нагрівальним елементом перетворювача та газом за умови, що електричний струм передається в періодичному режимі згідно гармонічного закону. Два параметри змінного сигналу підлягають вимірюванню: фазовий зсув температури газу на відстані  $d$  від нагрівача відносно фази зміни температури нагрівального елемента та частоти коливань, а також температура газу. Тоді густина визначається за рівнянням:

$$\rho = A \frac{\sqrt{T}}{\omega} \left( \frac{\Delta \varphi}{d} \right)^2, \quad (3.2)$$

де  $T$  - температура газу;

$\Delta \varphi$  - зсув фаз коливань на відстані  $d$  нагрівача;

$A$  - константа, яка визначається експериментально при калібруванні;

$a$  - термодифузія;

$x$  - координата нормалі до межі напівпростору.

Конструктивний параметр перетворювача  $d$  повинен бути визначений виходячи з робочих значень щільності середовища та оптимізований відповідно до результатів, показаних на рис. 3.3.

Розрахунки для описаної вище моделі датчика показують, що характеристика перетворення не є симетричною. Цей результат вимагає відповідного асиметричного розташування датчиків щодо нагрівача. Для двонаправленого вимірювання лінійної швидкості та одночасного зберігання максимальної чутливості методу буде потрібна матриця з чутливих елементів.

Абсолютна похибка вимірювання об'ємного потоку в діапазоні від 0,1 до 1,5 л / с була не більше  $\pm 0,045$  л / с, а межі допустимої відносної похибки при вимірюванні об'ємного потоку в діапазоні вимірювань від 1,5 до 15,0 л / с не більше  $\pm 3\%$

### 3.5 Динамічні методи вимірювання теплофізичних характеристик середовища

Динамічний метод вимірювання теплофізичних характеристик середовища, заснований на реєстрації зміни часових параметрів штучно створеної періодичної теплової хвилі, що розповсюджується в середовищі між джерелом і теплоприймачем. Метод теплофізичних вимірювань заснований на використанні періодичної теплової хвилі, що дозволило створити сенсорну теплофізичну інтегральну мікросистему підвищеної стабільності і чутливості. В основу методу покладено вимір часових параметрів штучно викликане теплової хвилі, що розповсюджується в середовищі між джерелом і приймачем тепла, тобто виконуючими чутливим елементами. Для фізикоматематичного обґрунтування даного методу використовується рішення задачі розповсюдження тепла в напів нескінченному тілі від джерела з температурою поверхні яка періодично змінюється за законом:

$$T_c = T_{max} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{\tau_0}\right), \quad (3.1)$$

де  $T_c$  - температура поверхні,

$T_{max}$  - амплітуда температурних коливань,

$\tau$  - час,

$\tau_0$  - період коливань

Рішення, що визначають зміну температури вздовж координати  $x$  по нормалі до поверхні:

$$T = T_{max} \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot \tau_0}} \cdot x} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{\tau_0} - \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot \tau_0}} \cdot x\right), \quad (3.2)$$

де  $x$  - координата по нормалі до поверхні.

Для будь-якої відстані  $x$  коливання температури мають один і той же період, проте на відстані  $x$  від джерела коливання запізнюються по фазі:

$$\Delta \tau = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\alpha \cdot \pi}} \cdot x, \quad (3.3)$$

де  $\Delta \tau$  - час запізнення.

Таким чином, в запропонованому методі теплове поле змінюється з плином часу періодично, що є основою для універсального чутливого елемента

анемометричного датчика з підвищеною чутливістю, оскільки в основу методу покладено вимірювання часових параметрів.

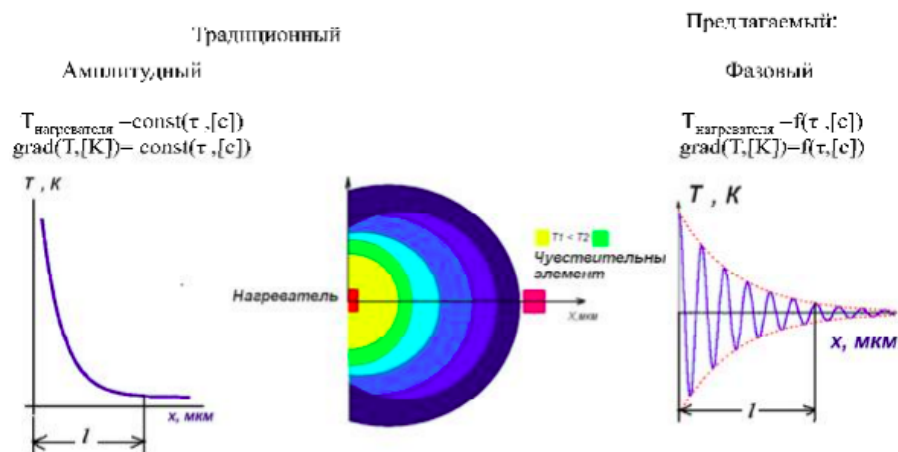


Рисунок 3.4 - Порівняння традиційного і даного методу теплофізичних вимірювання

### 3.6 Висновки до розділу

Аналітичний розрахунок на основі запропонованої моделі для датчика потоку газу температурної залежності від швидкості потоку рідини в структурі MEMS.

Отриманий результат є основою для реалізації перспективної конструкції багатофункціонального термореактивного датчика для двосторонньої реєстрації витрат газу.

В результаті експериментальних досліджень було виявлено, що точність результатів залежить від просторового розміщення нагрівача і реєструючого перетворювача. Тому експериментально потрібно підбирати оптимальну відстань між нагрівачем і термоприймачем.

Запропонована модель може бути використана у відкритих системах, таких як COMSOL, для розрахунку та опису роботи пристроїв, заснованих на використанні термоелектричних процесів у малогабаритних конструкціях.

## **РОЗДІЛ 4**

### **Обробка і передача сигналів з сенсора**

#### **4.1 Основні теоретичні положення по архітектурі мікропроцесорного ядра PSoC**

Мікросхеми PSoC фірми Cypress являють собою 8-бітний мікроконтролер, що містить мікропроцесорне ядро й масиви цифрових і аналогових блоків, що дозволяє реалізувати стандартні необхідні периферійні функції, наприклад ШІМ, АЦП або UART, так і такі незвичайні для мікроконтролерів, як аналогові фільтри і інструментальні підсилювачі. Із-за того, що PSoC дозволяє скоротити кількість зовнішніх використовуваних компонентів, що істотно спрощує процес розробки,

здешевлює пристрій й одночасно підвищує його гнучкість за рахунок можливості перепрограмування в системі або конфігурування внутрішньої структури прямо в процесі роботи. Таким чином одна мікросхема PSoC замінює декілька компонентів схеми, котра побудована на стандартних мікроконтролерах. Всі функції, внутрішнє з'єднання, внутрішня конфігурація, і навіть контакти введення і виведення перепрограмовуються. Під час роботи мікросхеми PSoC можна динамічно змінювати внутрішні ресурси, отримуючи при цьому нову систему.

Випускається декілька серій PSoC мікроконтролерів:

- а) CY8C21xxx;
- б) CY8C22xxx;
- в) CY8C24xxx;
- г) CY8C27xxx;
- г) CY8C29xxx.

Всі мікросхеми побудовані на базі восьмирозрядного ядра M8C гарвардської архітектури з тактовою частотою 24 МГц і продуктивністю 4 MIPS. Система команд досить проста і характеризується високою густиною коду. В наявності є вбудовані RC генератори на 24 МГц і 32 кГц. Робоча напруга процесора складає від 4,75 В до 5,25 В. Характеризується також малою споживаною потужністю при високій швидкодії. Діапазон робочих температур складає від -40°C до + 125°C [9].

Об'єм ОЗП 256-2048 байт, а ПЗП 2-64 Кбайт, котра створена на основі перепрограмованої флеш-пам'яті, що допускає до 100000 циклів запис/стирання. Організація флеш-ПЗУ в вигляді масива із секторів розміром 64 байт, дає додаткову можливість для емуляції EEPROM всередині PSoC. Мікросхема PSoC CY8C27443, є найпопулярніша в цій серії і має 12 аналогових і 16 цифрових блоків.

12 аналогових блоків PSoC містять:

- а) АЦП з роздільною здатністю до 14 розрядів;
- б) ЦАП з роздільною здатністю до 9 розрядів;
- в) Підсилювач з програмованим підсилювачем;
- г) Програмовані фільтри і компаратори [9].



16 цифрових блоків PSoC містять:

- а) 8-12 розрядний таймер, лічильник і ШІМ;
- б) Модулі CRC і PRS;
- в) До 4 повнодуплексних УАПП;
- г) Схему підключення до всіх ліній введення-виведення;
- г) Комплексні перефрійні пристрої за рахунок поєднання блоків [9].

Також тут наявна програмована конфігурація виводів:

- а) Навантажувальна здатність на всіх лініях введення-виведення 25 мА (втікаючий струм);
- б) Всі лінії введення-виведення можуть переводитися в одне із наступних станів: підтягуючий резистор до плюса чи до мінуса, високоімпедансний, двухтактний вихід чи відкритий стік;
- в) До 12 аналогових входів на всіх лініях введення-виведення;
- г) 4 аналогових входа з навантажувальною здатністю 40 мА на будь яких лініях введення-виведення;
- г) Конфігуроване переривання на всіх лініях введення-виведення.

Додаткові системні ресурси:

- а) Провідний, підпорядкований інтерфейс I2C з частотою синхронізації до 400 кГц;
- б) Вахтовий таймер і таймер режиму сну;
- в) Програмований детектор зниження температури;
- г) Вбудоване прецизійне джерело опорної напруги.

Кожний цифровий блок побудований на основі восьмирозрядного регістра. В програмному середовищі PSoC Designer можна до визначити топологію схеми цифрового блоку, і зробити так, щоб він працював як восьмибітний лічильник, таймер, ШІМ і т.д. Якщо з'єднати декілька цифрових блоків між собою можна отримати модулі більш високої розрядності, наприклад ті ж лічильники, ШІМи або таймери розрядністю 8, 16, 24, або 32 біта.

Процес конфігурації системи зпрощується за рахунок використання бібліотек модулів користувача, котрі являють собою раніше сконфігуровані і протестовані PSoC блоки. Тобто процес побудови систем зводиться до вибору готових модулів із бібліотек.

Аналогова частина PSoC побудована на базі аналогових блоків трьох видів: аналоговий блок з операційним підсилювачем і програмованою матрицею резисторів в колі оберненого зв'язку і два типи аналогових блоків на основі операційного підсилювача і перемикаючих конденсаторів. При деяких припущеннях резистор можна замінити конденсатором і двома комутуючими ключами. Для різних задач паралельно всередині PSoC використовується або резисторна, або конденсаторна топологія. Так, наприклад, на основі резистивних аналогових блоків можна побудувати програмовані підсилювачі і аналогові компаратори. На основі конденсаторних аналогових блоків можна реалізувати полосови чи низькочастотний фільтр. Комбінуючи цифрові і аналогові блоки можна отримати ЦАП і АЦП з розрядністю від 6 до 14 біт. Користувачу не потрібно думати чи резистивну, чи конденсаторну архітектуру вибрати. В PSoC Designer цей процес автоматизований.

PSoC підтримує інтерфейси RS232, I2C, SPI, UART, для зв'язку з зовнішніми пристроями. В наявності також РКІ контролера Hitachi HD44780 і внутрішній датчик температури. Для того щоб датчик температури показував точні значення, треба попередньо його калібрувати. Без калібровки покази температури будуть приблизні.

Всі мікросхеми виготовляються в промисловому температурному діапазоні ( $-40^{\circ}\text{C}$  -  $+85^{\circ}\text{C}$ ) і в корпусах DIP і SMD (від 8 до 100 ніжок).

Вбудований центральний процесор M8C тактує від внутрішнього генератора з частотою від 93,7 кГц до 24 МГц. Підлаштування частот відбувається програмним шляхом і дозволяє помітно знизити енергоспоживання і електромагнітні перешкоди. Розвинута система команд центрального процесора нараховує 136 інструкцій з середнім часом виконання 6 тактових циклів [9].

Із-за наявності цифрових і аналогових модулів на мікросхемах PSoC можна реалізувати модулі користувача котрі перераховані далі:

- а) АЦП та ЦАП;
- б) Підсилювачі, компаратори та аналогові мультиплексори;
- в) Фільтри;
- г) Широтно-імпульсні модулятори;
- г) Стек зірковоподібного мережевого протоколу (SNP), котрий реалізує функціональність концентратор чи вузла для підтримки бездротової зірковоподібної мережі ;
- д) Вимірювання температури;
- е) Блоки цифрового зв'язку, такі як I2C, UART, SPI;
- є) Спеціальні функціональні блоки, такі як світлодіодні / рідкокристалічні драйвери;
- ж) Ємнісні сенсорні рішення (сенсорні екрани, кнопки, повзунки, сенсори приближення тощо);
- з) Автоналаштування ємнісного користувацького модуля зондування. Не вимагає жодного мануального налаштування. Автоматичне внутрішньосистемне визначення всіх параметрів CapSense.[9];

Кількість таких модулів на одній мікросхемі PSoC залежить від кількості цифрових і аналогових блоків в даній мікросхемі.

Архітектура PSoC (рис.4.1) може бути розділена на чотири області: ядро, системні ресурси, цифрова система і аналогова система.

Для роботи з PSoC, нам необхідний пакет САПР PSoC Designer, що є основним засобом розробки. Він являє собою інтегроване середовище розробки, що містить редактор вихідних текстів програм та редактор внутрішньої структури програмної системи.

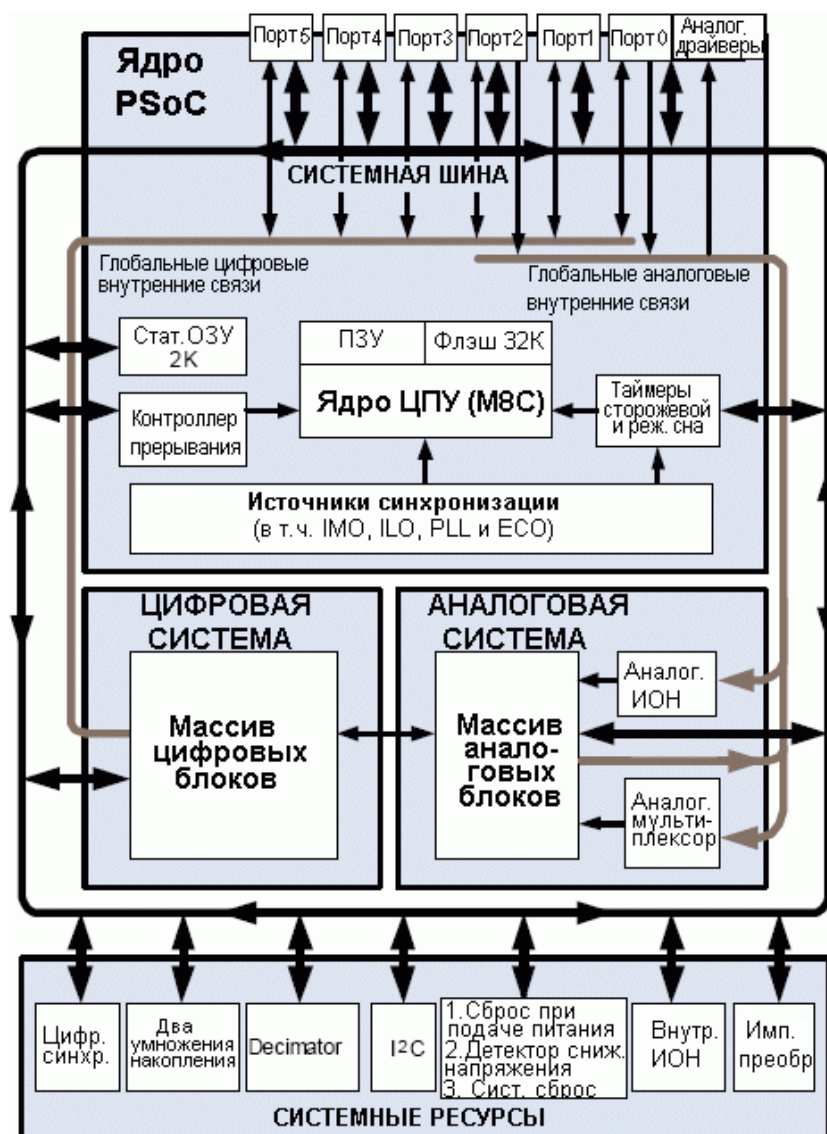


Рисунок 4.1 - Структурна схема PSoC [9]

В дипломній роботі для проектування використовується налаштовувальна плата типу PSoC 3 яка зображена на рис. 4.2.

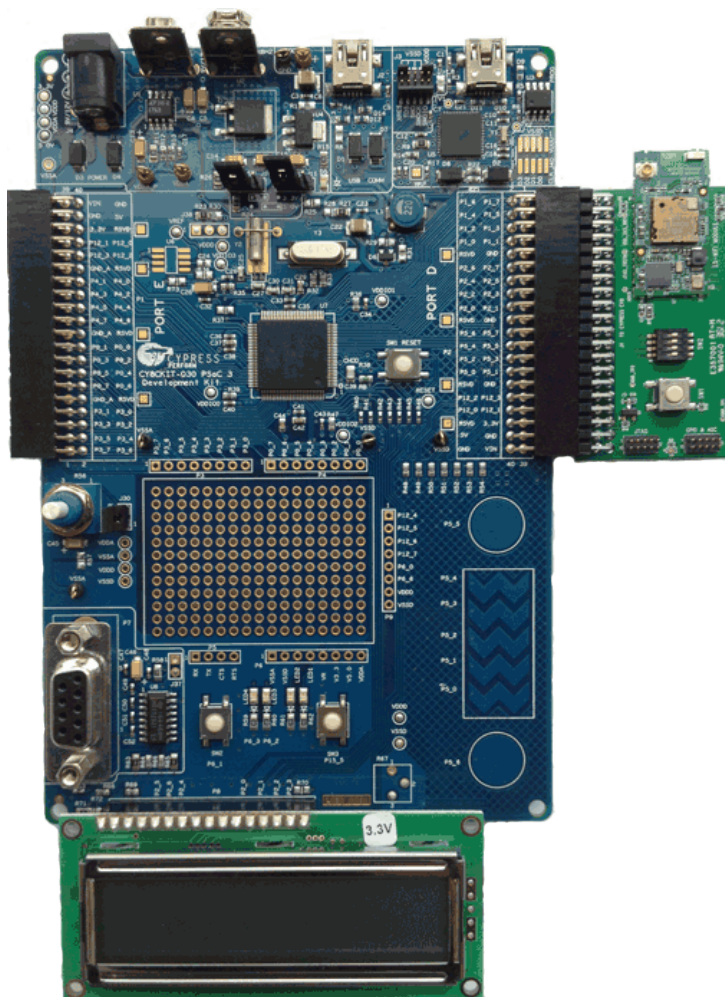


Рисунок 4.2 - Плата PSoC 3

#### 4.2 Основні теоретичні положення по архітектурі бездротового інтерфейсу PRoC

Для забезпечення бездротового інтерфейсу сенсори забезпечені мікросхемою PRoC (програмований радіоканал на кристалі) CYWUSB6953.

CYWUSB6953 - це повна радіосистема на мікросхемі, що дозволяє реалізувати багато простих радіочастотних систем за допомогою одного пристрою та декількох дискретних компонентів. CYWUSB6953 розроблений для реалізації недорогих бездротових систем, що працюють у діапазоні частот 2,4 ГГц у промисловому, науковому та медичному (ISM) (2400 ГГц - 2,4835 ГГц).

Мікроконтролер - це потужна масив із змішаним сигналом. Він має легко конфігуруємі та гнучкі цифрові та аналогові блоки.

Ядро мікроконтролера - це 8-бітний двигун M8C, який підтримує багатий набір інструкцій. Він містить 512 байт даних SRAM та 8 Кбайт коду флеш-пам'яті.

Радіостанція являє собою високопродуктивний прийомопередавач 2,4 ГГц із вбудованою базовою смугою DSSS. Радіо і основна смуга частот є гнучкою як по коду так і по частоті. Протоколи, які підтримують алгоритми запобігання перешкод з швидкою перебудовою частоти, такі як WirelessUSB, повністю сумісні з цьою радіостанцією.

На рис. 4.3 представлено блок-схему PRoC.

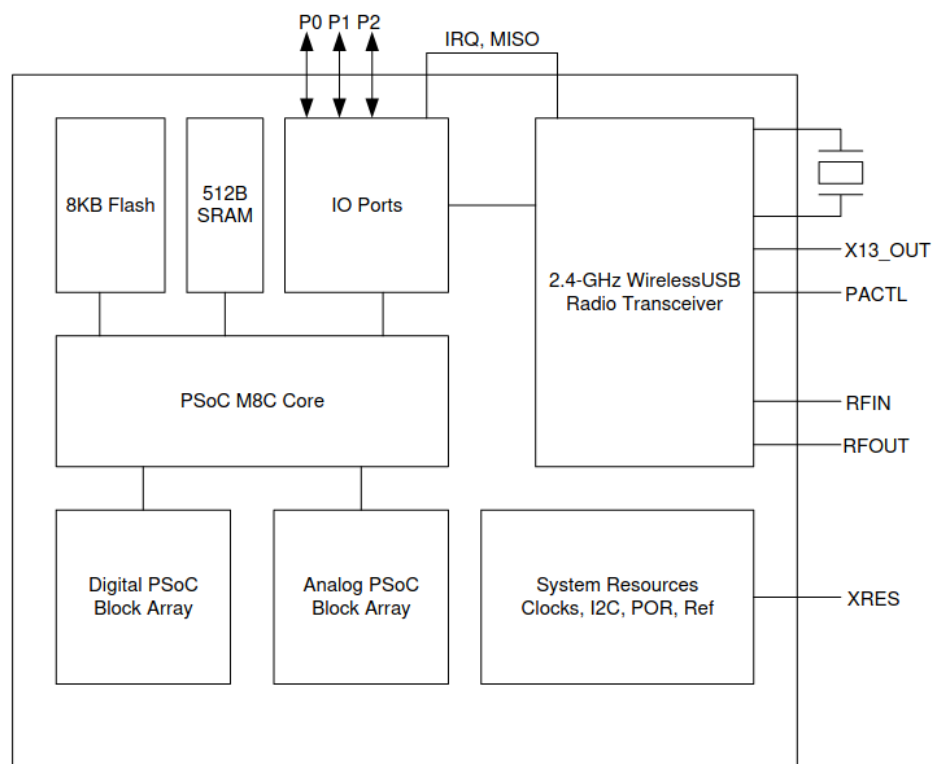


Рисунок 4.3 - Блок-схема PRoC

Також потрібно звернути увагу, що для роботи при  $V_{CC} < 3,0$  В тактова частота процесора повинна бути встановлена на 3 МГц відповідно до таблиці даних CY8C21534. Отже, при роботі нижче 3 В швидкість передачі даних по радіоканалу повинна бути встановлена на 16 Кбіт / с.

Інструмент PSoC Designer надає програмний модуль SPI UserModule для управління радіочастиною PRoC. Отже, існує пряма залежність між тактовою частотою процесора і підтримуваної швидкістю передачі даних по радіо. Для роботи з тактовою частотою процесора менше 12 МГц швидкість передачі даних по радіоканалу повинна бути встановлена на 16 Кбіт / с.

#### 4.3 Газові сенсори на основі PSoC і PRoC

Інтелектуальні сенсори з вбудованими мікроконтролерами і бездротовим інтерфейсом зв'язку з інформаційними системами більш високого рівня мають потенціал, щоб докорінно змінити системи контролю та управління промислових і побутових об'єктів.

Для визначення параметрів теплообміну в системі необхідні такі компоненти: джерело теплових збуджень (генератор електричного струму з малоінерційним нагрівачем), малоінерційний детектор температури (швидкодіючий датчик температури з підсилювачем), термометр (датчик температури з АЦП), електричні ланцюги аналогової обробки сигналів (підсилення, фільтрація), мікроконтролер з аналого-цифровим і цифро-аналоговим перетворювачами. Для забезпечення стандартних цифрових інтерфейсів необхідні цифрові комунікаційні модулі.

Якщо реалізувати вимірювальну схему на традиційних мікросхемах, отримана система буде досить громіздкою і дорогою. Унікальний чіп PSoC дає всі необхідні схемотехнічні компоненти.

Схема вимірювання сенсорів була реалізована на основі PSoC (програмована система на кристалі). Завдяки можливостям PSoC, інтелектуальний сенсор здатний виконувати самодіагностику, цифрове перетворення аналогового сигналу, що надходить з чутливого елемента, здатний компенсувати нелінійність функції перетворення, компенсує залежність від зовнішнього впливу (температури навколишнього середовища). Всі ці функції реалізовані на одному чіпі CY8C26466

(Рис.4.4). Чіп містить мікропроцесорне ядро, пам'ять, підсилювачі, фільтри, компаратор, АЦП, ЦАП, цифровий інтерфейс.

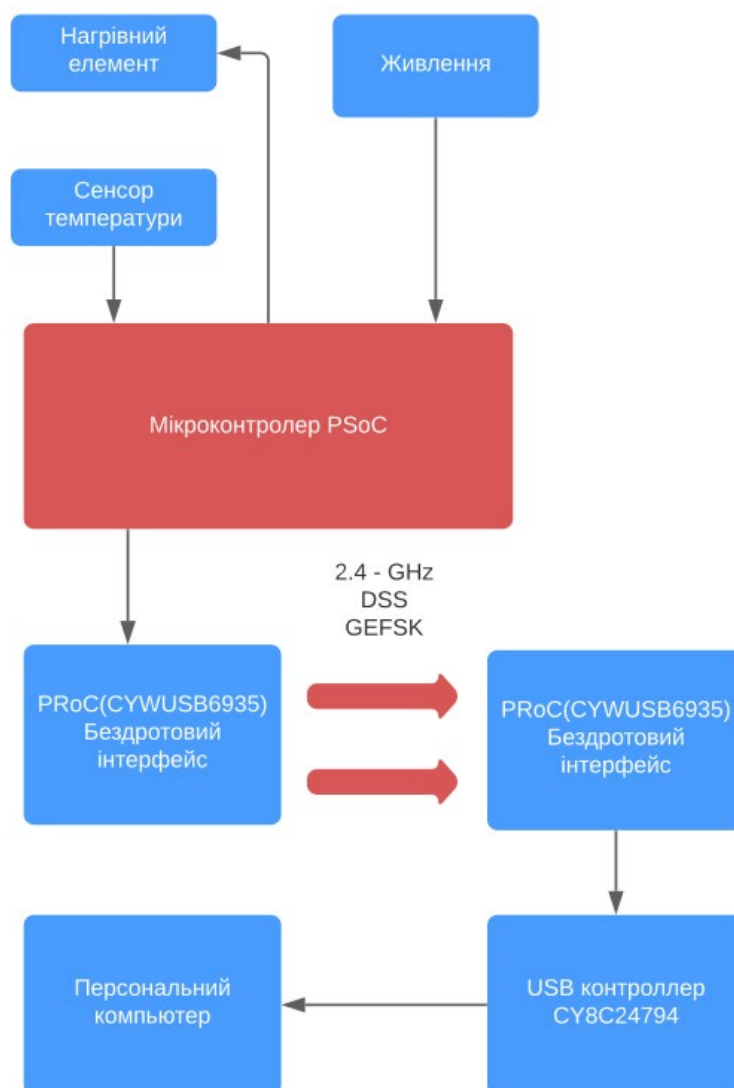


Рисунок 4.4 - Блок схема інтелектуального датчика

Сенсор температури тут це MEMS сенсор з структурою (нагрівач, чутливий елемент, пасивні компоненти).

Цей чіп дозволяє компонувати вимірювальні ланцюги з аналогових і цифрових блоків, які входять до складу системи на кристалі. Слід зазначити, що конфігурація вимірювального ланцюга може виконуватися динамічно, що дозволяє адаптуватися сенсору до постійно змінюваних умов вимірювання, в тому числі і зміною схеми вимірювання. Завдяки цього діапазон вимірювань тиску може бути дуже великим для одного сенсора.



Чутливий елемент стійкий до перевантажень по тиску і ніякий тиск не може зруйнувати його, один газовий сенсор тиску може забезпечити вимірювання тиску газу у всьому діапазоні агрегатного стану газу - від глибокого вакууму до перетворення газу в рідину.

Для забезпечення бездротового інтерфейсу сенсори забезпечені мікросхемою PRoC (програмований радіоканал на кристалі) CYWUSB6935. однокристальний приймопередавач CYWUSB6935 являється 2.4 ГГц - модемом з розширенням спектра сигналу прямої послідовністю (DSSS) і Гаусовим зміщенням частоти маніпуляції (GFSK). Зв'язок контролера PSoC з модемом здійснюється через послідовний інтерфейс SPI. Модуль CYWUSB6935 підтримує зв'язок на відстані до 50 метрів при швидкості передачі даних - до 62.5 Кбит / сек.

Для зв'язку сенсорів з персональним комп'ютером через інтерфейс USB служить блок бездротового зв'язку з USB контроллером. Блок містить аналогічний модуль зв'язку як і у сенсорів на базі CYWUSB6935 і USB контроллер CY8C24794, який підключається безпосередньо до бездротового модулю через послідовний інтерфейс SPI. (Fig.1).

#### 4.4 Температурний датчик на основі мікроконтролера PSoC Cypress

Для вимірювання коливання температури будемо використовувати в ролі сенсора звичайни терморезистор, який виготовлений по МЕМС технології.

Вимір опору терморезистора дозволяє легко визначити його температуру.

В даному методі вимірювання температури використовуються наступні ресурси мікроконтролера PSoC:

- а) ADCINCVR (АЦП зі змінною роздільною здатністю);
- б) PGA (програмований підсилювач) модуль користувача.

Терморезистор це напівпровідниковий елемент, опір якого зменшується з зростанням температури, графічно ця залежність зображена на рис.4.5. Приблизно зміну опору терморезистора можна виразити рівнянням 4.1.

$$\frac{R(t_1)}{R(t_2)} = A^{(t_1 - t_2)}, \quad (4.1)$$

де  $A$  - це деяка емпірична величина, котра менша за одиницю;

$t_1$  і  $t_2$  - два різних значення температури;

$R_1$  і  $R_2$  - опір за цих температур.

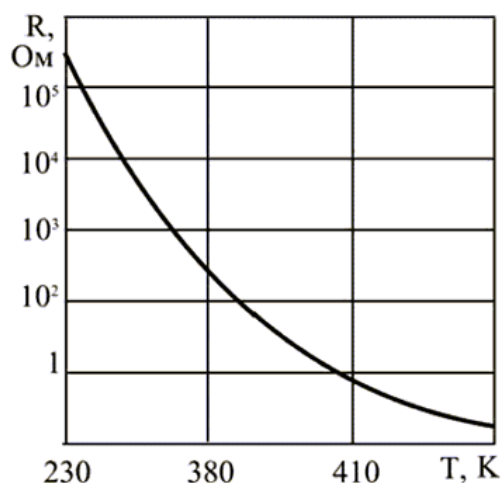


Рисунок 4.5 - Залежність опору напівпровідникового терморезистора від температури

Вираз (4.1) є приблизним, оскільки в даному випадку, це рівняння досить добре підходить для навчального пояснення властивості терморезистора, але не для реального приладу, який вимірює температуру.

Тому використовуємо для виміру температури рівняння Стейнхарт-Харта (Steinhart-Hart), котре описує зміну опору напівпровідникового терморезистора, в

залежності від температури. Згідно рівняння (4.2) це логарифмічний поліном третього порядку, з трьома константами.

$$\frac{1}{T_k} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R)^3, \quad (4.2)$$

де А, В і С – емпіричні константи;

R – опір терморезистора в Омах;

T<sub>k</sub> – температура в Кельвінах .

Але в нашому випадку більш корисна формула (4.3), оскільки вона показує результат температури в градусах Целсія.

$$T_c = \frac{1}{A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R)^3} - 273,15 \quad (4.3)$$

Розрахунок температури буде настільки точним, наскільки точними будуть вимірювання опору терморезистора.

На рис.4.6 показано вимірювальну схему опору терморезистора, яка підключається до відповідних виводів PSoC.

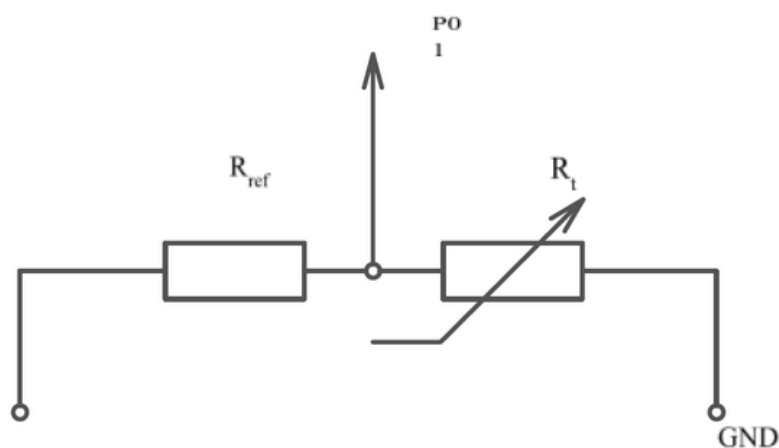


Рисунок 4.6 - Вимірювальна схема опору

Рівняння (3.4) показує, як визначити опір терморезистора.

$$R_t = \frac{U_{Rt} \cdot R_{ref}}{U_{ss} - U_{Rt}}, \quad (4.4)$$

де  $R_t$  – опір терморезистора;

$U_{Rt}$  - напруга на терморезисторі, котру зчитує PSoC за допомогою АЦП;

$R_{ref}$  – опір опорного резистора;

$U_{ss}$  – напруга живлення на мікроконтролері.

Як результат помилка виміру буде залежити від значення  $R_{ref}$  і від коефіцієнту підсилення.

Вимоги до точності еталонного резистора визначаються специфічними вимогами до повної точності вимірів.

Для нашого випадку будемо використовувемо терморезистор який по технічним характеристикам схожий на терморезистор серії YSI 44016. Це точний терморезистор який має наступні характеристики:

а) 10,000 Ом при 25°C;

б) Точність 0,2°C (1% від опору);

в) Робочий діапазон температур -80°C до +125°C .

Експериментально визначаємо залежність опору даного терморезистора від температури. Результати виміру наведені в таблиці №4.1.

Тепер згідно даних з таблиці №4.1, побудуємо графік (рис. 4.7) залежності опору терморезистора від зовнішньої температури, на якому явно видно, що даний терморезистор має експоненційну залежність опору від температури, тобто чим більша температура, тим менший опір терморезистора. Це означає, що наш терморезистор має від’ємний температурний коефіцієнт.

Рівняння Стейнхарта-Харта це поліном з трьома коефіцієнтами: А, В, С. По трьом точках, які вибираємо з таблиці №3.2. Нехай це будуть точки А ( $R_1=13,25$

кОм;  $T_1=16,76^{\circ}\text{C}$ ), В ( $R_2=3,90$  кОм;  $T_2=50^{\circ}\text{C}$ ), С ( $R_3=1,166$  кОм;  $T_3=91^{\circ}\text{C}$ ). Якщо коефіцієнти рівняння невідомі для конкретного терморезистора, то вони можуть визначатися по трьом опорам терморезистора при трьох різних температурах. Коефіцієнти знаходяться як розв'язок системи рівнянь (4.5).

$$\begin{bmatrix} 1 & \ln(R_1) & \ln^3(R_1) \\ 1 & \ln(R_2) & \ln^3(R_2) \\ 1 & \ln(R_3) & \ln^3(R_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_3} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

де  $R_1, R_2, R_3$  – значення опору при температурах  $T_1, T_2, T_3$ , відповідно;

Таблиця №4.1. Залежність опору терморезистора YSI44016 від температури.

Температура ( $^{\circ}\text{C}$ )	Опір (кОм)
16,76	13,25
19,50	12,55
25	9,74
32	7,45
41	5,13
50	3,90
60	2,92
70	2,19
80	1,57
91	1,166
100	0,892

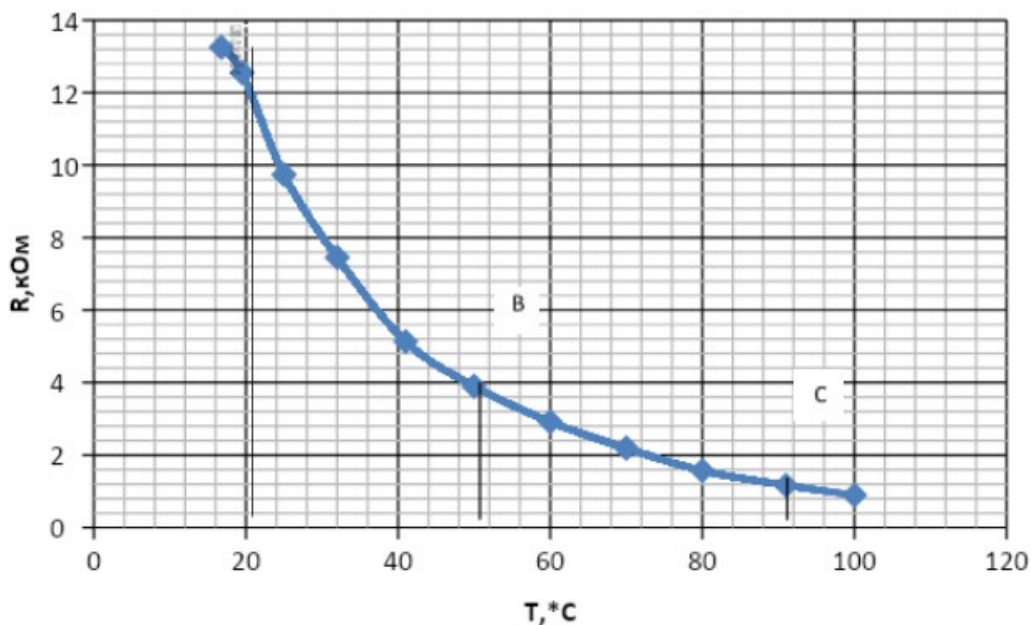


Рисунок 4.7 - Вимірювальна схема опору

Тепер підставляємо значення в систему (4.5) і розв'язуємо її:

$$L_1 = \ln(R_1), L_2 = \ln(R_2), L_3 = \ln(R_3);$$

$$Y_1 = \frac{1}{T_1}, Y_2 = \frac{1}{T_2}, Y_3 = \frac{1}{T_3};$$

$$Y_2 = \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1}, Y_3 = \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1};$$

Тепер виводимо формули для знаходження коефіцієнтів А, В і С:

$$C = \left( \frac{\gamma_3 - \gamma_2}{L_3 - L_2} \right) \cdot (L_1 + L_2 + L_3)^{-1}, \quad (4.7)$$

$$B = \gamma_2 - C \cdot (L_1^2 + L_1 L_2 + L_2^2) \quad (4.8)$$

$$A = Y_1 - (B + L_1^2 C) \cdot L_1 \quad (4.9)$$

Тепер підставляємо вже відомі значення в попередні формули і чисельно знаходимо коефіцієнти А, В, С:

$$C = \left( \frac{\frac{1}{364,15} - \frac{1}{323,15}}{\ln(1166) - \ln(3900)} \right) \cdot (\ln(13250) + \ln(3900) + \ln(1166))^{-1} = 2,5517 \cdot 10^{-8};$$

$$B = \frac{\frac{1}{323,15} - \frac{1}{289,91}}{\ln(3900) - \ln(13250)} - 2,5517 \cdot 10^{-8} \times$$

$$\times (\ln^2(13250) + \ln(13250) \cdot \ln(3900) + \ln^2(3900)) = 2,8406 \cdot 10^{-4};$$

$$A = \frac{1}{289,91} - (2,8406 \cdot 10^{-4} + \ln^2(13250) \cdot 2,5517 \cdot 10^{-8}) \cdot \ln(13250) = 7,312 \cdot 10^{-4}.$$

Для зручності запишемо коефіцієнти Стейнхарт-Харта в таблицю № 4.2.

Використовуючи ці коефіцієнти, за вимірними опорами можна визначити температуру. Точність отриманих значень буде в межах  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Таблиця №4.2. Коефіцієнти Стейнхарт-Харта для терморезистора YSI44016.

Коефіцієнти Стейнхарт-Харта	Значення
A	0,00073128
B	0,00028406
C	0,000000025517

Далі потріб оптимально підібрати еталонний резистор див. рис.4.6. Найточніший вимір можна отримати якщо у нас виконується умова (4.10).

$$R_t = R_{ref} \quad (4.10)$$

Коли співвідношення (4.10) виконується, значення напруг на кожному із двох резисторів відповідає половині повного діапазону для виміру АЦП.

Відповідно, точність отриманих чисел буде на 1 біт менше розрядності АЦП. Якщо, наприклад, один опір в 4 рази більший за інший, то величина напруги на першому резисторі відповідає 80% всього діапазону АЦП, а величина напруги на другому резисторі відповідає 20% діапазону. При цьому 80% діапазону АЦП

відповідає зменшенню точності на 13 біта, а 20% відповідає зменшенню точності на 2 біти від повної розрядності АЦП.

Головна проблема в тому, що опір терморезистора в залежності від температури змінюється в десятки разів, що веде до розкиду похибок.

В даному випадку обираємо значення еталонного резистора таким щоб можна було отримати максимальну точність при високих температурах (80°C-100°C). В нашому випадку значення опору еталонного резистора вибираємо 1 кОм. При використанні 13 розрядного АЦП, точність отриманих значень опору терморезистора в залежності від температури можна побачити в таблиці № 4.3.

Таблиця №4.3. Роздільна здатність АЦП залежно від опору резисторів.

°C	R <sub>T</sub> р,кОм	R <sub>тр, роздільна</sub> здатність АЦП, біт	R <sub>ref</sub> , кОм	R <sub>тр,розділ</sub> ьна здатність АЦП, біт
-40	336,500	13	10,000	8
25	10,000	12	10,000	12
80	1,255	10	10,000	13

На рис.4.8 зображена блок-схема з використанням ряду еталонних резисторів.

Коли вимкнутий Buf0, а Buf2 працює в якості еталонного резистора використовується  $R_{ref1}$ . Коли вимкнутий Buf2, а Buf0 працює, в якості еталонного резистора використовується  $R_{ref1} + R_{ref2}$ .

В даній розробці будемо використовувати архітектуру яка показана на рис. 4.8. Оскільки похибка терморезистора складає 1%, достатньо вибрати еталонний резистор з точністю 0,1%, що є достатньо щоб виключити внесену ним похибку.



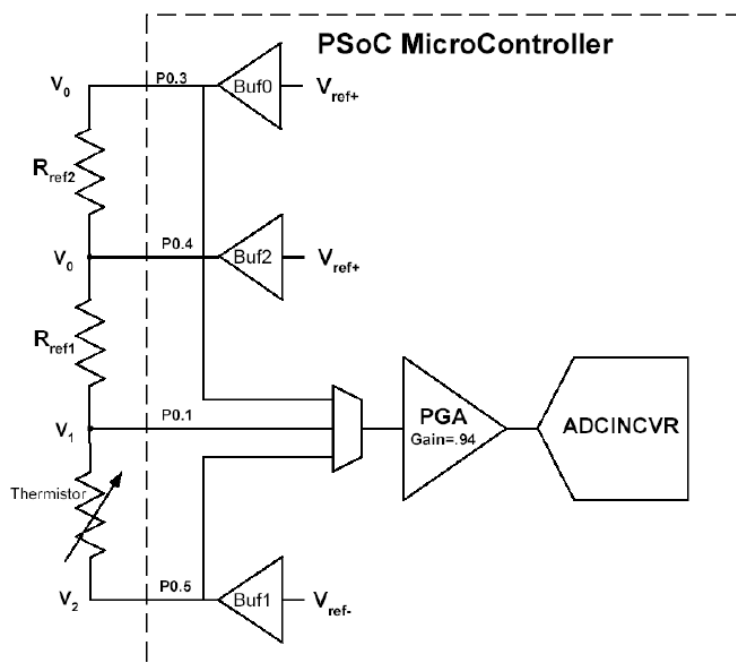


Рисунок 4.8 - Схема з перемикаючими еталонними резисторами

Після виміру опору терморезистора, отримане значення необхідно перевести в значення температури. Це можливо виконати двома способами:

а) Підставити значення опору в рівняння Стейнхарт-Харта і таким чином розрахувати температуру. Цей метод дає велику точність, але потребує виконання математичної операції з плаваючою точкою.

б) Використовуючи коефіцієнти Стейнхарт-Харта, розрахувати таблицю співвідношення температури до опору, для всього необхідного діапазону вимірювання. Ця таблиця може складатися з цілих чисел. Більш точніше значення можна отримати шляхом інтерполяції між числами із таблиці. Перевага цього метода в значній швидкодії, а недолік полягає в потребі великого простору ПЗУ для збереження таблиці [10].

#### 4.5 Обробка сигналу

Для подальшої обробки і передачі сигналу подаємо сигнал з терморезистора (теплоприймача) на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який вбудований вже на кристалі PSoC.

В складі PSoC - мікроконтролерів є до 12 аналогових блоків (Рис 4.9). Використовуючи вбудовані засоби комутації, можна з їхньою допомогою створювати модулі користувача (АЦП, ЦАП, ШИМ, і ін.).

Завдяки конфігурації аналогових блоків, їх комбінації між собою або комбінації аналогових і додаткових цифрових блоків стає можливим створення всередині мікросхеми PSoC наступних функціональних модулів: дельта-сигма АЦП; АЦП послідовного наближення; інтегруючий АЦП;

В даному прикладі наведемо нескладну схему (Рис. 4.10), в котрій знімається аналоговий сигнал з терморезистора, підсилюється блоком PGA, оцифровується АЦП і результат передається далі на термогенератор і на частотомір.

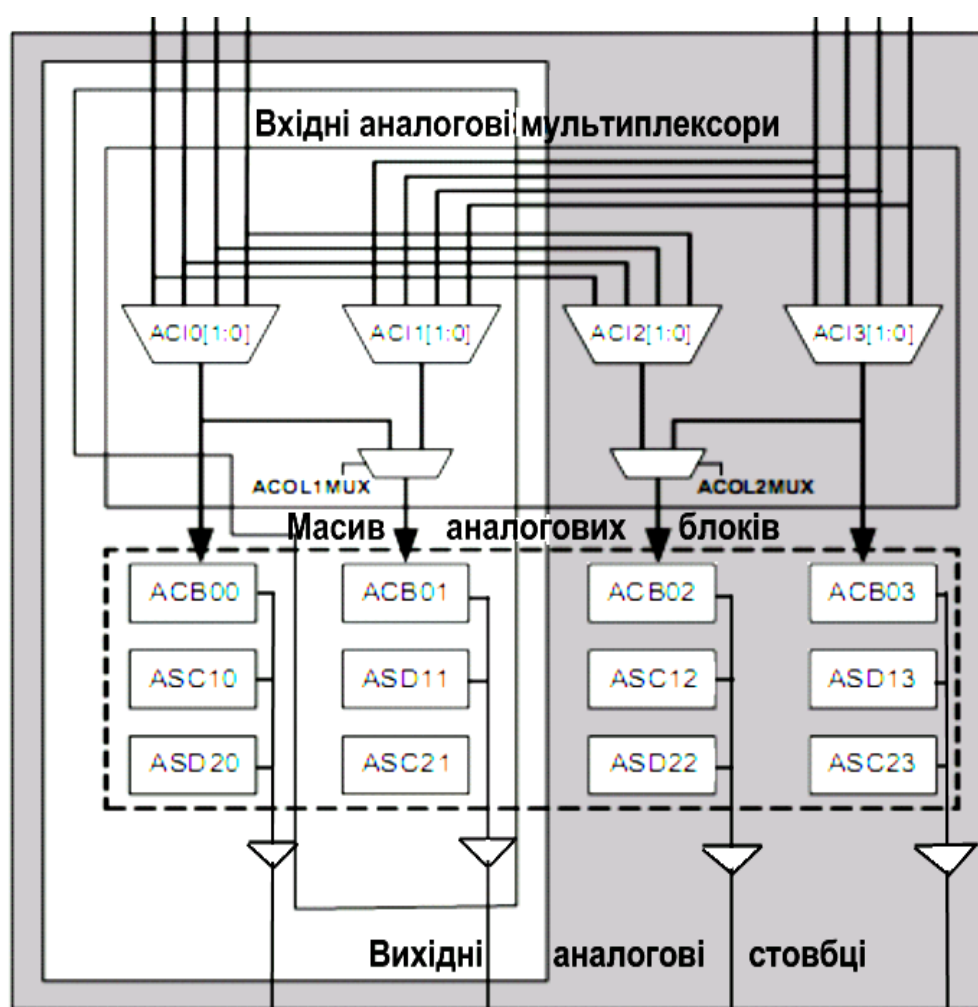


Рисунок 4.9 - Склад аналогової підсистеми

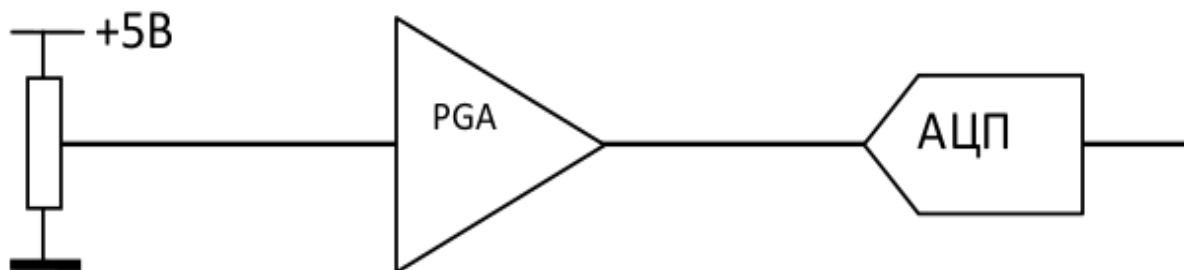


Рисунок 4.10 - Блок-схема АЦП перетворення

Редактор приладу може виконати в діалоговому режимі розміщення образотворчих аналогових та цифрових периферійних пристроїв серед модулів мікроконтролера, задати взаємозв'язок між ними, визначити ланцюги, що підключають до зовнішніх виводів мікросхеми й функції цих виводів (цифровий або аналоговий вхід / вихід). У редакторі міститься понад 50 готових модулів, які можна включити в проект, як закінчені компоненти системи. Для кожного із цих модулів у бібліотеці є опис.

Тепер наведемо приклад реалізації АЦП в програмі PSoC Designer. Лістинг такої програми виглядає наступним чином:

```

#include <m8c.h>
#include "PSoCAPI.h"
#include <stdlib.h>
int ADCResult; //змінна для результату аналого-цифрового перетворення
float volt = 5; // змінна для результату АЦП у вольтах
void main(void) {
M8C_EnableGInt; //дозволяємо глобальні переривання
PGA_1_Start(PGA_1_HIGHPOWER); //даємо живлення для підсилювача
ADCINCVR_1_Start(ADCINCVR_1_HIGHPOWER); //вмикаємо живлення АЦП
ADCINCVR_1_GetSamples(0); //старт аналого-цифрового перетворення
while(1) {
while(ADCINCVR_1_fIsDataAvailable() == 0); //чекаємо заверш.АЦП
ADCResult = ADCINCVR_1_iGetDataClearFlag(); //зберіг.результ.АЦП
volt = (ADCResult*5)/(0xffff); // переводимо в вольти
}
}

```

Розположення аналогових і цифрових блоків в цьому випадку наведені на рис. 4.11.

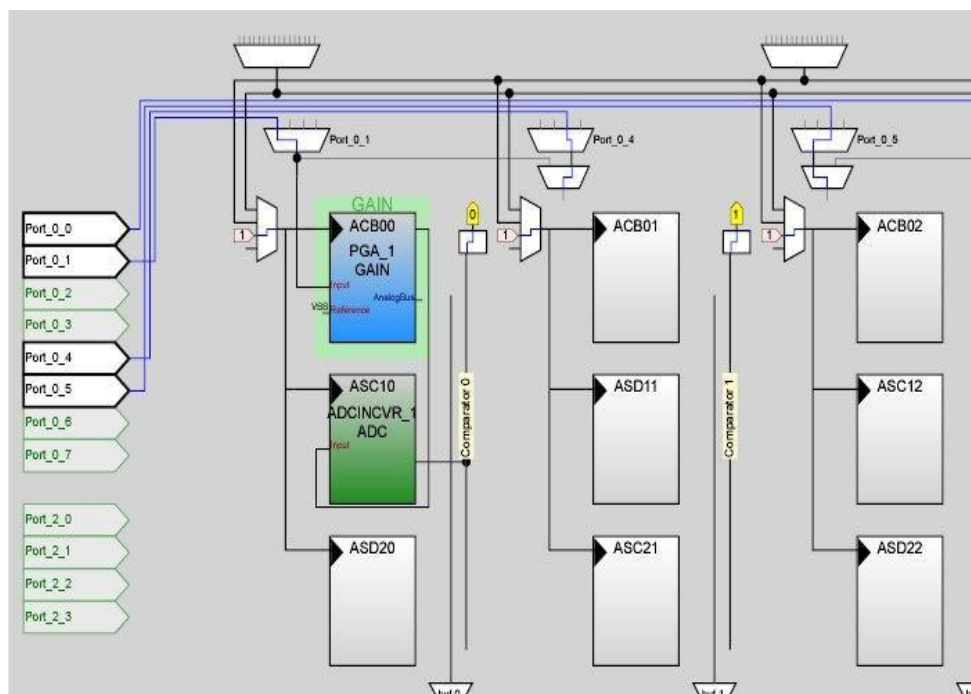


Рисунок 4.11 - Розположення аналогових блоків

Далі за отриманими значеннями частот з частотоміру розраховуємо потік газу, за алгоритмом який наведено в пункті 2.2.

#### 4.6 Висновки до розділу

На основі одного програмованого чіпа PSoC і тонкоплівковій структурі MEMS реалізована вимірювальна схема інтелектуальних газових сенсорів. Додатковий чіп PRoC забезпечує сенсорам завадостійкості бездротовий цифровий зв'язок в діапазоні 2.4-ГГц з персональним комп'ютером або інший інформаційною системою більш високого рівня. На основі подібних рішень можна будувати локальні бездротові сенсорні мережі збору даних в радіусі до 50 м. У локальних додатках сенсори також мають переваги за рахунок широкого діапазону вимірюваних величин, стійкості до критичних перевантажень, довговічності і стабільності характеристик.

## ВИСНОВКИ

Запропонована модель визначення густини газу працює по принципу залежності швидкості розповсюдження температурних хвиль в газі від маси та концентрації молекул газу. За допомогою змінного електричного струму та нагріваного елементу збуджують температурні хвилі в газі та вимірюють зсув фази температури газу на фіксованій відстані від нагріваного елементу.

Задана тема роботи є актуальною в області газовидобування. Оскільки там потребується висока точність визначення параметрів газу який транспортується в трубах. Тому ця розробка найбільш підходить для таких цілей.

Отриманий результат є основою для реалізації перспективної конструкції багатофункціонального термореактивного датчика для двосторонньої реєстрації витрат газу.

Висока точність та зручність методу обумовлена тим, що потік визначають по формулі, в котрій вимірювана величина лінійно залежить від частоти коливань, до формули входять величини, що можуть бути виміряні з високою точністю (частоти  $\omega$  та  $\omega_0$ ), та константи, що визначаються геометрією ( $A$ ,  $d$ ). Слід зауважити, що коливання електричного струму мають не гармонійну форму типу синусоїди, а коливання типу меандр, що забезпечує більшу завадостійкість. За рахунок подачі змінного струму на нагрівач, ми збільшуємо діапазон можливого вимірювання густини.

Для отримання максимальної точності в широкому діапазоні вимірюваних потоків, тепловий сенсор та нагрівач мають мати мінімальну теплоємність та геометричні розміри при максимальному відношенні площі до об'єму, щоб не вносити похибки за рахунок теплової інерційності.

Недоліком цього способу є нелінійна залежність зсуву фази коливань від величини потоку газу чи рідини, що призводить до того, що чутливість швидко падає зі зростанням величини потоку. Крім того, зсув фази коливань температури залежить від теплофізичних властивостей газу чи рідини, тому для різних середовищ необхідно підібрати оптимальну частоту коливань температури.

Запропонована модель може бути використана у відкритих системах, таких як COMSOL, для розрахунку та опису роботи пристроїв, заснованих на використанні термоелектричних процесів у малогабаритних конструкціях.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Электротехнические материалы: Учебное пособие/Л.Г. Петрова, Потапов М.А., Чудина О.В. – М. МАДИ (ГТУ). 2008. - 198 с - ISBN 5-230-24735-5.
2. Ю.М. Поплавко. Фізичне матеріалознавство. Ч. 3. Провідники та магнетики. / Ю.М. Поплавко, А. С. Воронов, Ю.І. Якименко. – К. Політехнік, 2011. – 372 с.
3. Поплавко Ю. Фізичне матеріалознавство. Ч. 3. Напівпровідники. / Ю.М. Поплавко, В.І. Ільченко, А. С. Воронов, Ю.І. Якименко. – К. Політехнік, 2011. – 333 с.
4. Бохов О.С. / ФИЗИКО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МИКРОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ : автореф. дис. канд. техн. наук Бохов О.С, Санкт-Петербург 2010
5. СИСТЕМИ ОБРОБКИ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ -3: науково-методичне видання / Укладач. В.Ф.Заворотний.- Київ, 2018 – 22 с. – ISBN 966-7505-22-7.
6. Разработка конструктивно-технологических основ производства микроэлектронных сенсоров для контроля технологических сред//Отчет о НИР(заключит.). Рук.д.т.н. проф. Коноплев Б.Г. Номер гос.рег. 01.9.50 001738. -Таганрог: 1994.
7. Бельшева Т.В., Боговцева Л.П., Казачков Е.А. Газочувствительные свойства допированных пленок на основе 1п203 как сенсоров N02 в воздухе // Журнал аналитической химии. 58 т. - №6. - 2003. - С. 1 - 6.
8. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов // 2-е изд. испр. - М.: URSS. -2008. - С. 589.296
9. Dave Van Ess, Термометр на основе микроконтроллера PSoC Cypress и терморезистора/ А. Кузминский/ChipNews. – 2016. – № 4(99). – С. 99.

10. Archana Yarlagaadda, Applications Engineer Senior, Cypress Semiconductor Corp./ Simplyng multi-chemistry battery chargers/ Published in EDN (<http://www.edn.com>) July 2011
11. Л.Н. Кечиев ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций / Кечиев Л.Н., Степанов П.В. – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 320 с.
12. Максимова Н.К., Катаев Ю.Г., Черников Е.В. Структура, состав и свойства газочувствительных пленок SnO<sub>2</sub>, легированных платиной и скандием // Физическая химия поверхностных явлений. 71 т. - № 8. - 1997- С. 1492 -1496.
13. Aagardl Roger L. MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY AND SPECIFIC HEAT/ Prior Lake; Ulrich Bonne, Hopkins; Robert J. Matthys, United States Patent